

MODELADO EN EL LABORATORIO DE LOS FLUJOS GENERADOS POR DIFERENCIAS DE DENSIDAD USANDO CRITERIOS DE SIMILARIDAD DINÁMICA

B. M. Marino¹, L. P. Thomas¹
Instituto de Física Arroyo Seco, Facultad de Ciencias Exactas
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina
Tel: 2293-439660/1 Fax: 2293-439669
E-mail. bmarino@exa.unicen.edu.ar, lthomas@exa.unicen.edu.ar

RESUMEN: Presentamos una técnica basada en criterios de similitud de la Mecánica de Fluidos para modelar en el laboratorio los flujos generados por diferencias de densidad en el interior de edificios. Construimos un modelo a escala bajo el criterio de similitud geométrica y usamos agua en vez de aire como sustancia de trabajo. Las fuentes de calor se reemplazan por fuentes de agua salada respetando la similitud dinámica. El procesamiento digital de las imágenes utilizando un software específico de bajo costo permite visualizar el flujo y realizar mediciones cuantitativas. En particular, estudiamos el flujo en el interior de un sistema sencillo compuesto de dos habitaciones separadas por una pared con dos aberturas, en el cual la diferencia de flotación es generada por una fuente de calor situada en el piso de una de las habitaciones. Los resultados experimentales son confrontados con las correspondientes soluciones analíticas, encontrándose un buen acuerdo.

Palabras claves: flujos generados por diferencia de densidad, estratificación, similitud dinámica, ventilación natural

INTRODUCCIÓN

La calidad del espacio interior es cada vez más importante para el ser humano, y los interiores que cuentan con una adecuada renovación del aire son más cómodos para vivir y trabajar, mejorando la calidad de vida de sus ocupantes. Factores externos como el viento y la energía térmica resultante del calentamiento solar, e internos como el calentamiento producido por artefactos electrónicos, eléctricos y a gas, pueden combinarse para facilitar el movimiento de aire dentro de los edificios y su ventilación, minimizando o evitando la utilización de equipos mecánicos que insumen cantidades apreciables de energía.

Como consecuencia, se ha renovado el interés por desarrollar una mejor comprensión de la dinámica de los flujos de aire dentro del edificio, el que la mayoría de las veces está formado por múltiples espacios conectados principalmente por puertas y contiene diferentes fuentes de calor internas. Las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de un edificio y entre los diferentes ambientes interiores producen fuerzas de flotación debidas a las diferencias de densidad. La tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse en la parte superior de las habitaciones produce una estratificación estable afectando las estructuras del flujo, lo que puede conducir a configuraciones bastante diferentes según los casos determinadas esencialmente por la localización de las aberturas y respiraderos.

El análisis de estos flujos suele realizarse con recursos teóricos y/o numéricos, y comparando los resultados con los datos obtenidos en mediciones directas y en modelos de laboratorio. En particular, los modelos de laboratorio requieren de técnicas especiales para la visualización del flujo y la obtención de resultados cuantitativos. Una metodología experimental muy difundida para visualizar el flujo consiste en el empleo de humo en modelos a escala colocados generalmente en túneles de viento (Yarke *et al.*, 2004; Kozak & Fernandez, 2001; Fernández *et al.*, 1999 y referencias citadas en ellos). Datos cuantitativos requieren, sin embargo, el empleo de técnicas más complejas. Esto sucede, por ejemplo, si se requiere conocer las distribuciones de presión para diferentes orientaciones del edificio respecto del viento incidente. En este caso, los coeficientes de presión son determinados y usados para calcular el flujo a través de aberturas en diferentes sitios de la fachada. Los resultados son entonces aplicados directamente desde las pruebas en túneles de viento a edificios de escala completa, o valores empíricos son dados dependiendo de la localización del edificio (Dascalaki & Santamouris, 1996). De esta información, los flujos volumétricos a través del edificio son relacionados con la velocidad del aire.

El estudio de los flujos interiores generados por diferencias de temperatura, como los debidos a fuentes de calor internas, requiere de otros sistemas experimentales. Presentamos aquí una técnica basada en criterios de similitud dinámica para la modelación de estos flujos en el laboratorio, que usa agua en vez de aire y fuentes de agua salada como fuentes de calor. Con el fin de exponer la implementación de tales experimentos y la obtención e interpretación de información relevante al problema del diseño, restringimos nuestra atención al caso sencillo del flujo conducido por una diferencia de temperatura entre dos habitaciones de igual tamaño separadas por una pared con dos aberturas. La diferencia de flotación es generada por una fuente de calor situada en el piso de una de las habitaciones. Esta situación cuenta con la ventaja de tener una solución analítica (Thomas *et al.*, 2006) que describe la evolución temporal del flujo y permite la comparación cuantitativa de los

¹ Investigador del CONICET

resultados obtenidos. La implementación de la metodología experimental para estudiar eventualmente el flujo de aire con el exterior del modelo, como ocurre en sistemas ventilados naturalmente, se describe en las conclusiones.

SIMULACIONES EN EL LABORATORIO

El análisis de los flujos generados por una diferencia de densidad a pequeña escala tiene dificultades especiales debido a los efectos viscosos propios de los flujos con bajos números de Reynolds. En consecuencia, la mayoría de los estudios directos fueron realizados a escala completa (1:1) (Lane-Serff, 1989) y restringidos a flujos en un ambiente único (algunas veces parcialmente dividido). Para superar este problema, se desarrolló la metodología del modelado a pequeña escala usando agua (Linden *et al.*, 1990; Baker & Linden, 1991) siendo las fuerzas de flotación producidas por la diferencia de salinidad dentro del fluido. Es conveniente entonces expresar la fuerza de flotación en función de la gravedad reducida $g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho} = g \frac{\Delta T}{T}$,

donde g es la aceleración de la gravedad y $\Delta\rho/\rho$ es el cambio fraccional de la densidad producido por una diferencia de temperatura $\Delta T/T$ (con T medida en grados Kelvin). Los parámetros adimensionales de interés son el número de Reynolds $Re = UH/\nu$ y el número de Pelet $Pe = UH/\kappa$ donde ν es la viscosidad del fluido, κ es el coeficiente de difusión molecular, y H es una escala vertical típica. Para flujos gobernados por diferencias de densidad, la velocidad U escala con $(g'H)^{1/2}$ y entonces $Re = \frac{(g'H)^{1/2} H}{\nu}$ 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 los valores a escala completa. Trabajando con diferencias de salinidad en agua se obtienen valores mas grandes de g' y mas pequeños de ν y κ , lográndose los valores necesarios de Re y Pe . Tanto en los flujos de pequeña escala así modelados como en los de escala completa, Re y Pe tienen valores por encima de 10^3 , y el flujo resulta independiente de los efectos viscosos y difusivos, excepto para escalas muy pequeñas. Comparaciones cuantitativas entre mediciones realizadas en modelos de laboratorio y a escala completa (Lane-Serff, 1989; Savardekar, 1990) confirman que los flujos de gran escala son bien representados cuando se trabaja en pequeña escala usando esta modalidad. Una diferencia de temperatura de 3°C en aire corresponde a una diferencia de densidad de aproximadamente 1% en agua.

También es posible extender esta técnica al uso de agua a diferentes temperaturas. Aunque no se puedan obtener valores tan grandes de g' en este caso, las mediciones muestran un buen acuerdo cuantitativo entre los resultados de experimentos térmicamente estratificados y aquellos con estratificación salina. Esta concordancia implica que se logran valores de Re y Pe suficientemente altos usando agua calentada, posibilitando el uso de diferentes condiciones de contorno tales como paredes calentadas o enfriadas para simular otros efectos de la ventilación natural (Sandberg & Lindstrom, 1990; Linden, 1999).

El flujo debido a la presencia de una fuente de calor con un flujo calórico W viene dado por $B = \frac{g\gamma W}{\rho C_p} = g'Q$, donde $\gamma = T^{-1}$ es

el coeficiente de expansión, C_p es la capacidad calorífica específica a presión constante y Q es el caudal asociado. El flujo B se relaciona con el flujo de empuje o 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.

Descripción de los experimentos

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 formando dos espacios 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 (Hunt & Kaye, 2001); está ubicada en la parte superior de una de las cámaras que llamaremos "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 es $B = gQ_s(\rho_s - \rho_w)/\rho_w = 90.9 \text{ cm}^4/\text{s}^3$. 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 la posterior medición de su volumen y masa, permitiendo comprobar el valor de B .

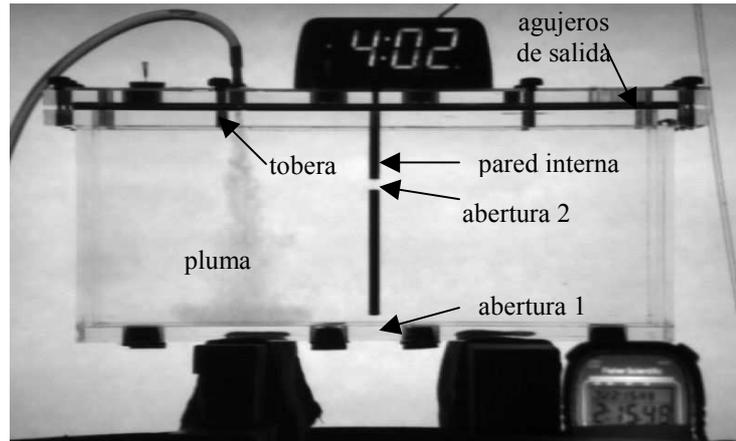


Figura 1. Vista lateral de un experimento que muestra la disposición del modelo físico. Invertiendo esta situación experimental, se tiene el caso correspondiente al de dos habitaciones con una fuente de calor en el piso de una de ellas.

La Figura 1 muestra una vista lateral de un experimento típico después de un corto tiempo de iniciado. Un colorante neutro es agregado al agua salada para proveer la visualización del flujo. Se aprecia el ingreso de la pluma turbulenta de agua densa por la tobera que ya alcanzó el fondo de la cámara forzada. La pared vertical divisora 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 aire entre dos habitaciones interconectadas, una de ellas con una fuente de calor. Los parámetros que caracterizan los distintos experimentos realizados se presentan en la Tabla 1, incluyendo el tiempo t_s al cual el fluido mezclado comienza a fluir por los agujeros de salida.

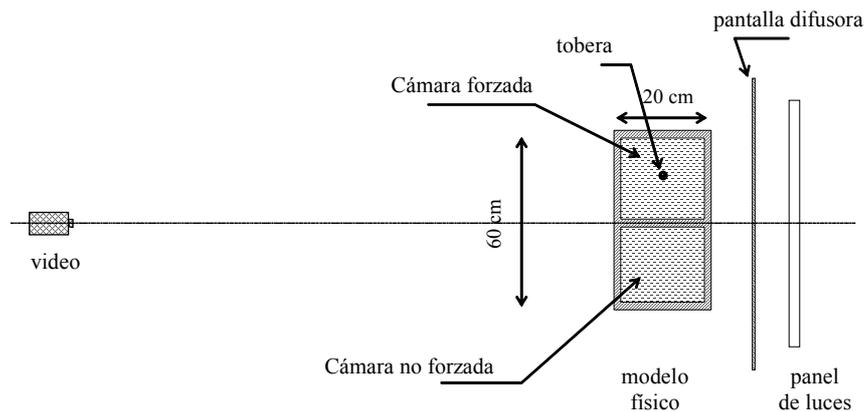


Figura 2. Esquema de la vista superior de la disposición experimental.

Experimento	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 h y el ancho de las aberturas se expresan en metros.

Un panel de luces fluorescentes y una pantalla difusora son colocados a un lado del modelo y una video cámara a 5.2 m del otro lado como se indica en la Figura 2. El colorante agregado a la sal reduce la intensidad de la luz proveniente del panel, y la disminución está relacionada con la densidad del fluido promediada en el ancho de la caja. Promediando las imágenes tomadas de la video-cámara con el método implementado por Cenedese & Dalziel (1998) (ver también Thomas *et al.*, 2003) se obtiene la distribución de densidad. Las imágenes digitalizadas son procesadas con el software **DigImage** (Dalziel 1993, 1995) y programas desarrollados por los autores.

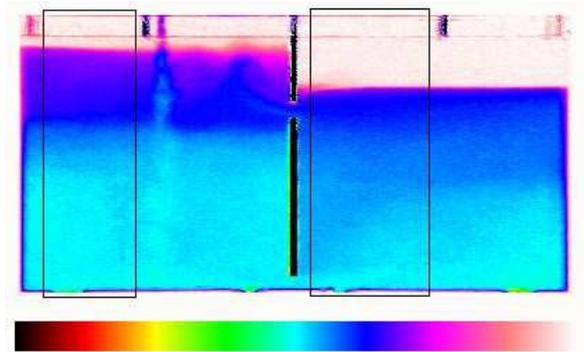


Figura 3. Vista lateral del experimento mostrado en la Figura 1 luego de procesarla digitalmente. La escala en la parte inferior muestra la diferencia de densidad desde cero (blanco) correspondiente al agua pura, al máximo valor (cyan) correspondiente al fluido mezclado (agua y agua salada).

La Figura 3 muestra una típica imagen digitalizada y procesada en falso color. Se calculan los promedios de las intensidades horizontales en cada fila de píxeles de las ventanas indicadas. Estos valores de intensidad promedio en función de la posición vertical proveen el perfil de densidad en función de la profundidad. Puesto que se forma una estratificación vertical uniforme a partir de un corto tiempo posterior al comienzo del experimento, la integración del perfil de densidad vertical permite conocer la masa de fluido en cada habitación. El exceso total de masa en la caja se obtiene sumando los valores del exceso de masa en ambas habitaciones. Su valor sigue una función lineal del tiempo puesto que el flujo de masa incorporado por la tobera permanece constante hasta que el agua salada comienza a salir por los agujeros aliviadores en el cielorraso de la cámara no-forzada. Esta conducta permite estimar la densidad mediante el procesamiento de las imágenes con un error inferior al 2%.

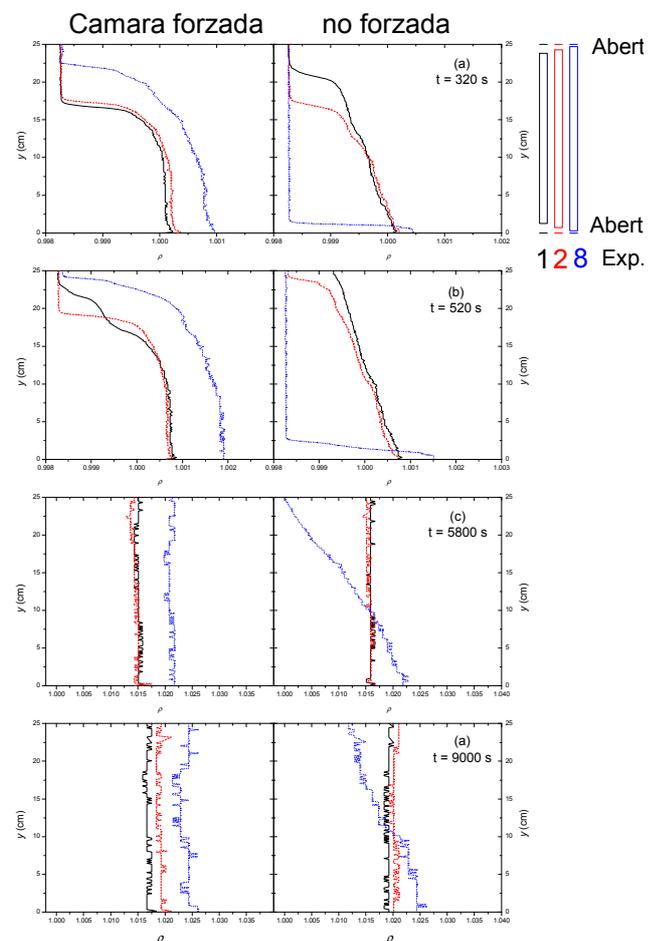
RESULTADOS

Los experimentos se agruparon en cuatro series para analizar la influencia de cada parámetro por separado. Presentamos aquí sólo aquellos resultados que nos permiten apreciar la potencialidad de la técnica utilizada.

La Figura 4 muestra, para tres experimentos, los perfiles de densidad de 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 atraviese los agujeros de salida.

Figura 4. Perfiles verticales de densidad promediada horizontalmente en las habitaciones forzada y no-forzada para tres experimentos: línea continua: experimento 1 ($A^*/H^2 = 0.031$); línea de trazos: experimento 2 ($A^*/H^2 = 0.017$); línea de puntos: experimento 8 ($A^*/H^2 = 0.0036$). Las aberturas se localizan sobre la pared compartida en contacto con el cielo raso y el fondo de acuerdo al esquema que aparece arriba a la derecha.

A $t \approx 320$ s (Fig. 4a) una fuerte estratificación y un frente de densidad están presentes en ambas habitaciones en los tres casos. Los perfiles de densidad son análogos para las dos situaciones de aberturas más grandes (líneas continua y de trazos). En el experimento realizado con las aberturas mas pequeñas (línea de puntos) la habitación forzada



parece llenarse casi independientemente de lo que sucede en la habitación no-forzada debido a la pequeña cantidad de masa que fluyó por la abertura inferior; también se observa que la habitación forzada contiene más fluido denso que en los otros dos casos. La densidad más alta en ambos espacios sugiere que el mezclado global es menos intenso en este experimento.

A $t \approx 520$ s (Fig. 4b) sólo en el experimento realizado con las aberturas más grandes (línea continua) el fluido mezclado alcanza los agujeros de salida; esto sugiere que el mezclado es más intenso en este caso puesto que el exceso de la masa total 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 aliviadores. 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 el salto de densidad continúa 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 (4c). Finalmente, los perfiles del caso de aberturas más pequeñas también muestran una tendencia a la uniformidad (4d). Para tiempos grandes ambas habitaciones tienen la misma densidad uniforme.

Los resultados experimentales se comparan con los resultados del modelo teórico dispuesto para analizar la convección generada por una fuente de calor en un sistema de dos habitaciones conectadas y aisladas del exterior (Thomas *et al.*, 2006). Dicho modelo describe el flujo entre ambas habitaciones para diferentes ubicaciones y áreas de las dos aberturas sobre la pared compartida, y las características de la pluma generada por la fuente, y puede extenderse con relativa facilidad para estudiar configuraciones y regímenes más complejos, generalizando los modelos previamente reportados.

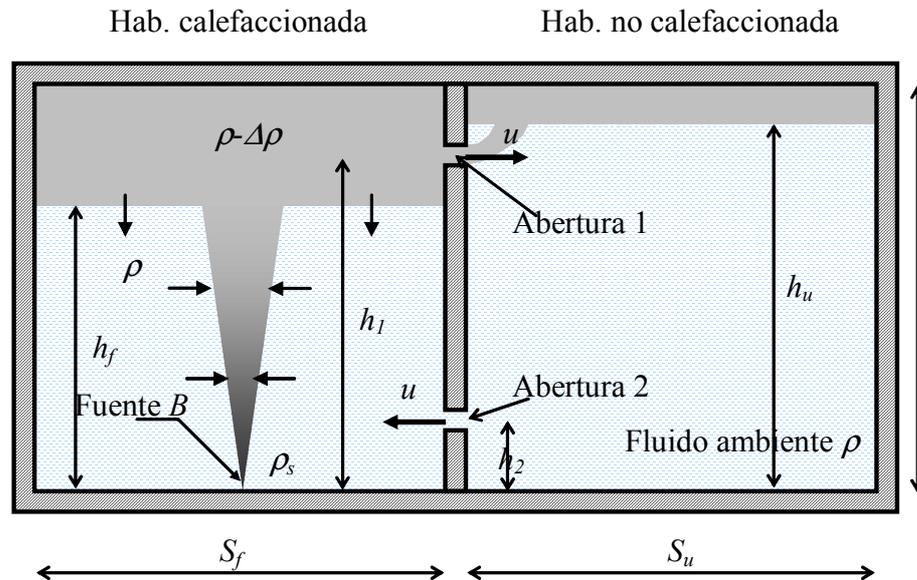


Figura 5. Esquema de la situación estudiada por el modelo teórico cuando solo la habitación ubicada a la izquierda tiene una fuente puntual de calor.

En particular, el modelo teórico considera dos habitaciones de altura H y áreas transversales S_f y S_u como las mostradas en la Figura 5. Ambos espacios están conectados por medio de dos aberturas, 1 y 2, localizadas a las alturas h_1 y h_2 desde el piso, respectivamente ($h_2 < h_1 < H$). En el espacio que denominamos “calefaccionado” [= “forzado” en los experimentos] hay una pluma turbulenta elevándose desde una fuente de calor de pequeñas dimensiones situada a nivel del piso. Al otro espacio lo distinguimos como “no-calefaccionado” [= “no-forzado” en la disposición experimental]. Como primer resultado se obtiene el tiempo adimensional $\tau = S_f B^{-1/3} H^{2/3}$ característico del problema bajo estudio y depende de las particularidades de la pluma, pero es independiente de la distribución de la gravedad reducida en el estrato cálido.

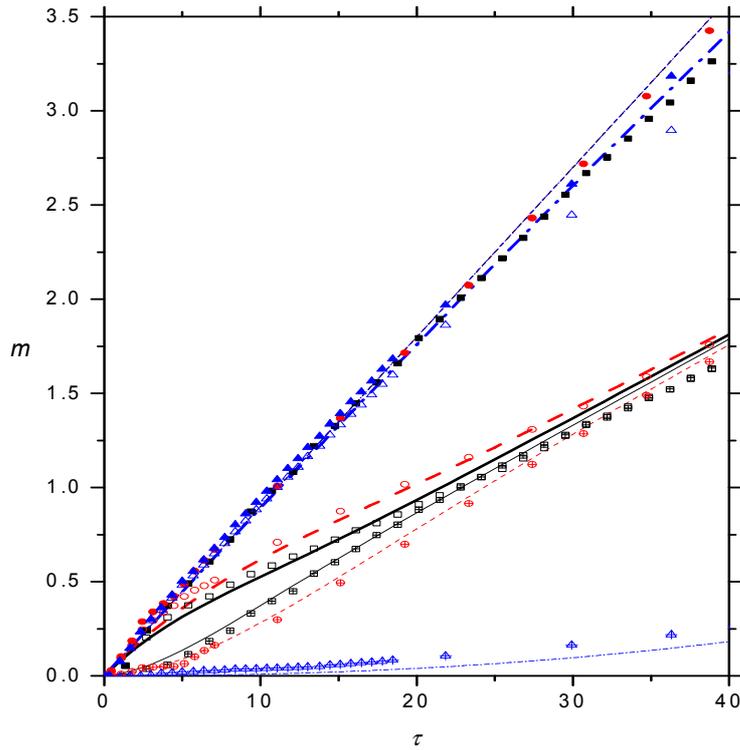


Figura 6. Resultados experimentales de los casos mostrados en la Figura 4 (símbolos huecos para la habitación forzada, símbolos con cruz para la habitación no-forzada y símbolos llenos para ambas habitaciones) y las correspondientes predicciones teóricas (líneas).

La Figura 6 muestra una comparación entre los resultados experimentales y teóricos para los tres casos considerados en la Figura 4. Hay un buen acuerdo general sobre la evolución de los excesos de masa total para $t \leq t_s$, como es de esperar. Para $t > t_s$, el acuerdo se pierde gradualmente porque la conservación de la flotación total ya no es más válida en los experimentos. Sin embargo, se espera que los resultados sean válidos para la situación física considerada por el modelo, en la cual no hay volumen liberado por la fuente y por lo tanto el volumen contenido en las dos habitaciones se conserva estrictamente.

La Figura 7 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). Las evoluciones de m en los experimentos 1 y 3 son análogas desde el comienzo (como se aprecia en la ampliación del recuadro) porque la abertura 1 está sobre el fondo y entonces el flujo a la habitación no-calefactada 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 a parecerse a aquel 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 los mismos para estos experimentos. Lo mismo sucede para los experimentos 3 y 7, aun cuando los correspondientes t_s son algo diferentes. La similitud de las evoluciones para tiempos grandes ($t \gg t_s$) indica que la tasa del fluido mezclado liberado por los agujeros aliviadores y, por lo tanto, el mezclado interior en la caja son principalmente afectados por la posición de la abertura 2.

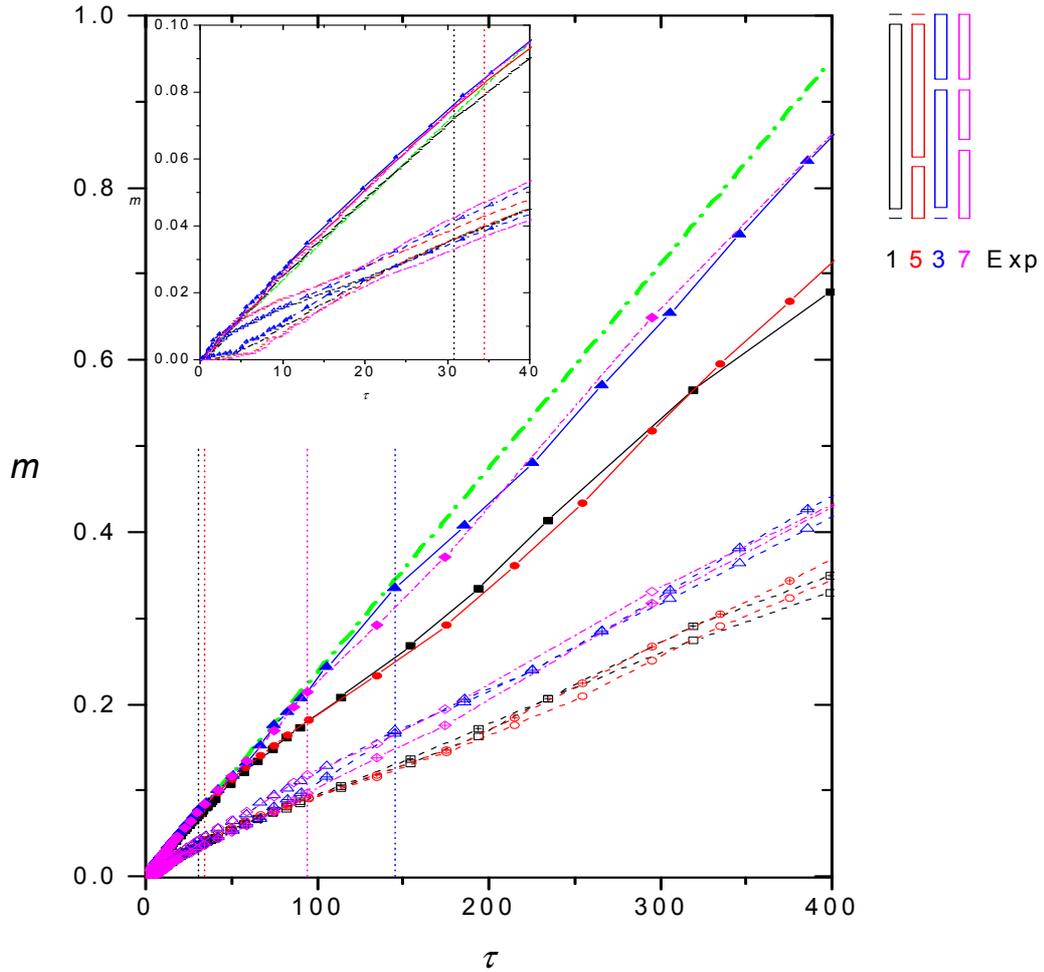


Figura 7. Evolución del exceso de masa contenido en la habitación calefaccionada (símbolos abiertos), en la habitación no- calefaccionada (símbolos con cruz), y en ambas habitaciones (símbolos llenos) para los experimentos 1, 5, 3 y 7 (ver Tabla 1). Las líneas verticales de puntos indican el tiempo t_s en el que el fluido mezclado comienza a abandonar la caja.

CONCLUSIONES

Se describe la modelación en el laboratorio, bajo requerimientos de similaridad dinámica, de los flujos de intercambio generados por diferencias de densidad. En particular, se estudió un sistema sencillo de dos habitaciones aisladas al exterior pero interconectadas a través de un par de aberturas de distintos tamaños que ocupan diferentes posiciones, y con una fuente de calor en una de ellas. Los resultados obtenidos son cotejados con los de un modelo teórico desarrollado por Thomas y *et al.* (2006) arribándose a un buen acuerdo.

Entre las ventajas que presenta esta técnica, destacamos las siguientes:

1. El agua permite lograr una fácil visualización del flujo usando *shadowgrafia* o colorantes para marcar los distintos flujos actuantes. Las imágenes del flujo constituyen una forma eficaz de transmitir información a los diseñadores.
2. El rango adecuado de los números adimensionales relevantes relacionados con la viscosidad y la difusión pueden ser mantenidos, permitiendo extrapolar las mediciones realizadas en el laboratorio.
3. Las mediciones cuantitativas de densidad pueden realizarse usando técnicas de procesamiento digital de imágenes como las utilizadas aquí. Análogamente, pueden obtenerse los campos de velocidad de los flujos por medio de la técnica *particle tracking velocimetry*.

La modelación en el laboratorio realizada permite tener resultados cuantitativos del sencillo sistema estudiado. Se encontró que el exceso de calor contenido en las cámaras sigue una estructura análoga hasta alrededor de 15-20 tiempos característicos en todos los casos, confirmando el tiempo característico $S/B^{1/3}H^{2/3}$ sugerido por el modelo teórico. La reducción del tamaño de las aberturas aumenta la diferencia de densidad promedio entre ambas habitaciones y t_{ss} , lo cual es consistente con una

reducción del mezclado. La mayor estratificación en la habitación no-calefacionada evoluciona más lentamente y entonces la eficiencia del sistema aumenta porque el fluido está menos mezclado, la misma masa ocupa un volumen más pequeño y por lo tanto se pierde a través de los agujeros aliviadores posteriormente.

Considerando la disposición en la Figura 5, una altura mayor de la abertura 1 aumenta el tiempo para el cual el aire cálido comienza a fluir a la habitación no-calefacionada. Sin embargo, t_s y el mezclado final resultan poco afectados. Por el contrario, 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 $h_2 < H$.

El buen acuerdo encontrado entre los resultados experimentales y los teóricos sugieren que la modelación basada en la similitud fluidodinámica es apta para estudiar los flujos más complejos que se generan en configuraciones que combinan espacios, aberturas, fuentes y variaciones de temperatura con el exterior en viviendas y edificios. Para analizar los flujos de intercambio entre el interior y el exterior de un edificio, el modelo físico debe sumergirse en un tanque mayor lleno de agua y de paredes transparentes. Los resultados también pueden emplearse para validar modelos teóricos simplificados y simulaciones numéricas, y para determinar los valores adecuados de los parámetros cuyas mediciones pueden ser difíciles de realizar en las construcciones reales.

REFERENCIAS

- Baker N. y Linden P.F. (1991) Physical modelling of airflows – a new design tool. Atrium Build. Archit. Eng., pp. 13-22, Ed. F. Mills. CICC Publications, Welwyn, Inglaterra.
- Cenedese C. y Dalziel S.B. (1998) Concentration and depth field determined by the light transmitted through a dye solution. En Proceedings of the 8th International Symposium on Flow Visualization. Ed. G.M. Carlomagno & I. Grant. ISBN 0953399109, paper 061 (cd rom).
- Dalziel S.B. (1993) Rayleigh-Taylor instability: experiments with image analysis. Dyn. Atm. Oceans 20, 127-153.
- Dalziel S.B. (1995) DigImage: System overview. Cambridge Environmental Research Consultants, Reino Unido.
- Dascalaki E. y Santamouris M. (1996) Natural Ventilation. En Passive Cooling of Buildings, ed. M. Santamouris, D. Asimakopoulis, pp. 220-306. Londres: James & James.
- Fernández, A., Casablanca, G., Eguía, S., Delbene, C., Torres, S. y Mühlmann, S. (1999) Simulaciones de movimiento de aire en salas de internación utilizando el túnel de viento y el programa Phoenix. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 3, 8.161-8.164.
- Hunt G.R. y Kaye N.G. (2001) Virtual origin correction for lazy turbulent plumes. J. Fluid Mech. 435, 377-396.
- Kozak, D. y Fernández, A. (2001) Resultados de la aplicación de una metodología de evaluación de movimiento de aire en espacios interiores. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 5, 8.91-8.96.
- Lane-Serff G.F. (1989) Heat flow and air movement in buildings. Ph.D. Tesis. Universidad de Cambridge, Reino Unido.
- Linden P.F. (1999) The fluids mechanics of natural ventilation. Ann. Rev. Fluid Mech. 31, 201-238.
- 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.
- Savardekar K. (1990) Aspects of passive cooling. A study on natural ventilation. M.Phil. Tesis, Universidad de Cambridge, Reino Unido.
- Sandberg H. y Lindstrom S. (1990) Stratified flow in ventilated rooms: a model study. Proc. ROOMVENT'90, Oslo, Norway. Junio 13-15.
- Thomas L.P., Marino B.M., Tovar R. y Linden P.F. (2006) Buoyancy-driven flow between two rooms coupled by two openings at different levels. Enviado a J. Fluid Mech.
- Thomas L.P., Marino B.M., Estela M.S. y Mandrini, M. (2003) Diagnosticas ópticas para la edición de la concentración de trazadores pasivos: Aplicación a las corrientes de gravedad. Proc. VIII Reunión sobre Recientes Avances en Física de Fluidos y sus Aplicaciones, Noviembre 12-14, Tandil, Argentina. www.exa.unicen.edu.ar/fluidos.
- Yarke, E., Pujol, M., Vitali, L. y Seoane, M. (2004) Ventilación natural – Estimación de parámetros sobre modelos a escala utilizando equipamiento de bajo costo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 8, 8.1-8.6.

LABORATORY MODELLING OF BUOYANCY-DRIVEN FLOWS USING DYNAMICAL SIMILARITY CRITERIA

ABSTRACT: We present the results found applying a technique based on fluid-dynamical similarity criteria to model in the laboratory the buoyancy-driven flows developed in buildings. We construct a scaled model of the studied system, typically 10 times smaller, under the criterion of geometric similarity and use water instead air as the working substance. The heat sources are replaced by salt water sources following the dynamic similarity rules. The digital image processing using a low-cost specific software allows us to visualize the flow and make quantitative measurements. In particular, we study the flow inside a simple system composed of two rooms separated by a wall with two openings, and isolated from the environment. The difference of buoyancy is generated by a heat source located on the floor of one room. The experimental results are validated with analytical solutions, and a good agreement between them is found.

Key words: buoyancy-driven flows, stratification, dynamical similarity, natural ventilation