

CONVECCION TERMICA ENTRE HABITACIONES Y EL EXTERIOR

Luis Cardón y Daniel Hoyos
INENCO, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177, 4400 Salta

RESUMEN

Se investiga experimental, teórica y numéricamente la convección natural que ocurre entre una habitación y el exterior ocasionada por diferencias de temperatura. Mediante análisis de escalas se encuentra la forma de la dependencia $Nu = \hat{N}u(Ra)$ para $Pr \sim O(1)$ que predice el Nu a primer orden. Se comparan estos resultados con los obtenidos en forma numérica. También se analizan perfiles de velocidad y temperatura obtenidos experimentalmente sobre habitaciones en escala real.

INTRODUCCION

En el marco del Proyecto 252 y su continuación el Proyecto 378 "Ventilación en Viviendas y Edificios" del Consejo de Investigación de la UNSa, se ha encarado un conjunto de actividades tendientes a caracterizar y cuantificar los efectos de la ventilación en viviendas. Entre las configuraciones de interés por su aplicación a la climatización de verano, se comenzó por la investigación de la ventilación a través de grandes aberturas, es decir puertas y ventanas, bajo la acción de diferencias de temperatura entre el interior y exterior, una situación aún muy poco estudiada. Se emplean dos métodos de estudio: 1) el experimental, midiendo perfiles de velocidades y temperaturas en el plano de ventanas que comunican habitaciones con el exterior y 2) el numérico, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes bajo la aproximación de Boussinesq en dos dimensiones para un dominio que representa la situación estudiada experimentalmente.

Además del interés propio del problema planteado, la comparación y evaluación de los resultados obtenidos por ambos métodos constituye un objetivo aún más importante. Por un lado, la medición de perfiles de velocidad en escala real es sumamente compleja si no se posee anemometría de vector total, y debe ser acompañada por visualización. La influencia de la envolvente de la vivienda y la dirección del viento se hace preponderante aún ante la presencia de brisas suaves, cambiando la naturaleza del problema bajo estudio. Cuestiones tales como si los resultados numéricos para dos dimensiones son aplicables, dónde los son, y cómo pueden complementarse con los resultados experimentales, etc., son pertinentes y se tratan de responder en este trabajo.

ANTECEDENTES

Cavidades abiertas

Las cavidades abiertas o parcialmente abiertas han recibido comparativamente muy poca atención hasta el presente. Bejan y Rossie [2] obtienen resultados experimentales para la convección natural entre dos reservorios conectados por un conducto. Pennot [5] examina numéricamente una cavidad completamente abierta por uno de sus lados mientras que en los restantes se impone una única temperatura. Obtiene resultados para $Pr = 0.7$ y $10^3 < Ra < 10^7$ para varias inclinaciones. Escribe la ecuación de Navier-Stokes en la formulación vorticidad-función de corriente, discretiza con diferencias finitas y resuelve mediante un método de direcciones alternantes sobre un dominio extendido fuera de la cavidad. Chan y Tien [12] estudian numéricamente la misma geometría, Pr y Ra , bajo diferentes condiciones de borde, imponiendo temperatura únicamente en la pared enfrentada a la abertura. Los mismos autores resuelven las ecuaciones pertinentes en variables primitivas aplicando el método SIMPLER. Utilizan dominio extendido y también una aproximación que no lo requiere. Mao et al. [7] resuelven numéricamente dos configuraciones muy similares al caso bajo estudio en el presente trabajo. Estas corresponden a una habitación totalmente abierta al exterior y una habitación conectada al exterior con una puerta. El objeto del estudio de Mao et al. es la propagación de fuego en el interior de edificios. Hess y Henze [4] estudian experimentalmente la configuración más aproximada a la de nuestro interés, consistente en una cavidad cuadrada con una pared lateral calentada y con una ventana centrada en la pared opuesta. A diferencia de nuestro caso en el cual la cavidad está asentada en el suelo, la cavidad estudiada por Hess y Henze está inmersa íntegramente en el seno del fluido. El estudio se hizo para $Pr = 7$ (agua) y $3 \times 10^3 < Ra < 2 \times 10^{11}$. Los resultados obtenidos por Hess y Henze serán descritos en detalle en la siguiente sección.

Regímenes de flujo en el problema de la cavidad abierta

La situación estudiada por Hess y Henze es en todo similar a la que tenemos aquí bajo estudio numérico y tiene algunas diferencias con la que estudiamos experimentalmente. La diferencia radica en que en la simulación numérica, como en el experimento de Hess y Henze, se imponen súbitamente condiciones de temperatura en la pared activa, mientras que en el experimento real de abrir una ventana entre una habitación y el exterior ya existe en el interior de la habitación un campo de velocidades y una estratificación de la temperatura. Queremos destacar que una idealización de la situación real no es imposible de simular numéricamente. En el trabajo de Hess y Henze se describe a partir de observaciones experimentales un flujo inicial áltamente tridimensional, luego se establecen sucesivamente tres regímenes de flujo a) primero la pluma convectiva rebota en la pared arriba de la ventana y se observa un flujo oscilatorio, b) luego se acumula una capa de fluido caliente en la cercanía del techo y se producen dos grandes vórtices, c) Después de un extendido período de tiempo el fluido se estratifica en la parte superior de la cavidad hasta la altura del borde superior de la apertura y allí queda prácticamente estanco. En el plano de la ventana Hess y Henze observan a) que el flujo es tridimensional y b) que para una sección vertical de la ventana el flujo

saliente está concentrado en una muy pequeña región al lado del marco superior e inmediatamente abajo el flujo entra a la habitación en una zona también pequeña. En el resto de la ventana el flujo es muy lento.

ANÁLISIS DE ESCALA EN ESTADO ESTACIONARIO.

Se considerará la situación idealizada mostrada en la figura 1, en la cual en una habitación bidimensional la pared fría o caliente, que se llamará "la pared", se encuentra enfrentada a una ventana abierta. En la figura mencionada se muestran las dos configuraciones de flujo posibles: a) pared caliente con respecto a la temperatura del aire exterior y b) pared fría con respecto a la temperatura del aire exterior. En el caso de verano, estas configuraciones corresponden a la noche y al día respectivamente.

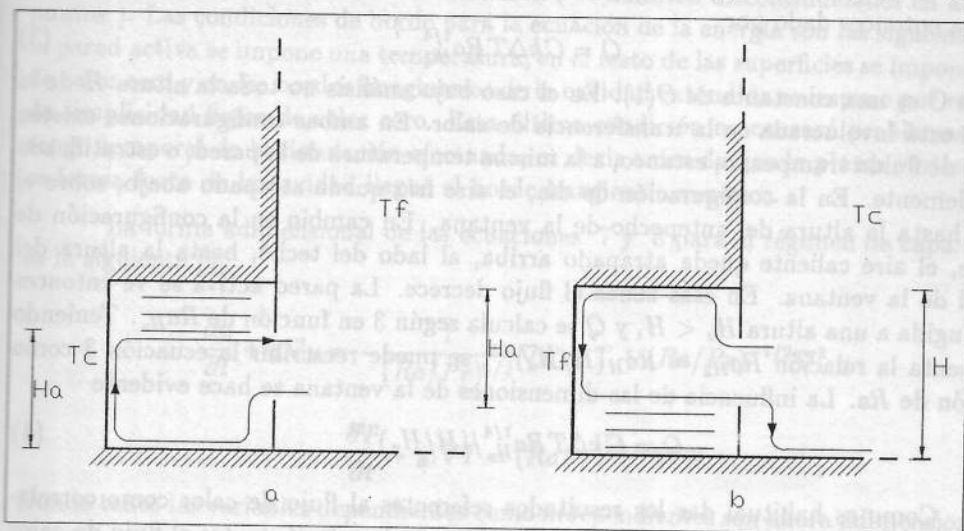


Fig. 1. Esquema de la cavidad conectada al exterior.

La pared, de altura H , intercambia calor con el exterior generando un lazo de convección natural. En la literatura se denomina a este mecanismo "termosifón". El calor Q intercambiado por la pared modifica la temperatura del aire adyacente a ella, en una capa límite térmica de espesor δ , y consiguientemente su densidad genera una fuerza de flotación que impulsa una capa límite hidrodinámica de espesor δ_v . La única resistencia a la transferencia de calor entre la placa y el exterior está ofrecida por esta capa límite y su orden de magnitud o escala está dado por δ/kH , donde k es la conductividad térmica del aire. La escala del espesor de la capa límite térmica para fluidos con número de Prandtl Pr de orden mayor que 1, está dada en función del número de Rayleigh Ra_H por

$$\frac{\delta}{H} = Ra_H^{-1/4} \quad (1)$$

$$Ra_H = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} \quad (2)$$

Para el aire, con $Pr=0.7$, la ecuación 1 es marginalmente válida. El flujo de calor

Tabla 1			
Ra	Nu, Chan y Tien, [12]	Nu, Penot, [5]	este trabajo
	$(H/H_a) = 1$	$(H/H_a) = 1$	$(H/H_a) = 3/2$
1×10^3	1.33		
2.7×10^3		~ 4	
2.7×10^4		~ 5	
1×10^5			4.4
2.7×10^5		~ 11	
1×10^6	15		
2.7×10^6		~ 17	
1×10^9	10		

resulta entonces dado por

$$Q = Ck\Delta TRa_H^{1/4} \quad (3)$$

donde C es una constante de $O(1)$. En el caso bajo análisis no toda la altura H de la pared está involucrada en la transferencia de calor. En ambas configuraciones existen zonas de fluido trapeado, estanco, a la misma temperatura de la pared, o estratificado establemente. En la configuración de día, el aire frío queda atrapado abajo, sobre el piso, hasta la altura del antepecho de la ventana. En cambio en la configuración de noche, el aire caliente queda atrapado arriba, al lado del techo, hasta la altura del dintel de la ventana. En esas zonas el flujo decrece. La pared activa se ve entonces restringida a una altura $H_a < H$, y Q se calcula según 3 en función de Ra_{H_a} . Teniendo en cuenta la relación $Ra_{H_a} = Ra_H(H/H_a)^{-3}$, se puede reescribir la ecuación 3 como función de Ra . La influencia de las dimensiones de la ventana se hace evidente

$$Q = Ck\Delta TRa_H^{1/4}/(H/H_a)^{3/4} \quad (4)$$

Como es habitual dar los resultados referentes al flujo de calor como correlaciones del número de Nusselt Nu que se define como la relación entre el flujo de calor por convección, Q , al flujo de calor que habría en el caso de conducción pura sobre la longitud L de la habitación, Q_k , resulta

$$Nu = \frac{Q}{Q_k} = \frac{Q}{kH\Delta T/L} = C \left(\frac{L}{H} \right) \frac{Ra^{1/4}}{(H/H_a)^{3/4}} \quad (5)$$

Para $Ra = 1 \times 10^5$ y una relación $H_a/H = 2/3$ el factor $(H/H_a)^{3/4}$ implica una reducción del Nu del 30%, y resulta $Nu \sim 13$. Como $L/H \sim O(1)$ y suponiendo que $C \sim O(1)$ es comparable con el que corresponde a una placa plana, $C = 0.364$, obtenemos que $Nu \sim 4.7$, valor cercano al obtenido numéricamente en este trabajo. La Tabla 1 compara el orden predicho con otros resultados numéricos disponibles (los valores dados por Chan y Tien y Penot corresponden a una cavidad totalmente abierta en un lateral.)

ECUACIONES GOBERNANTES Y SOLUCION NUMERICA

Las ecuaciones que describen el problema son: las ecuaciones de continuidad para el flujo incompresible, las ecuaciones de Navier-Stokes bajo la aproximación de Boussinesq, y la ecuación de la energía:

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \underline{u} \nabla \underline{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g\beta \Delta T + \nu \nabla^2 \underline{u} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (8)$$

Estas ecuaciones se resuelven sobre un dominio geométrico descrito por la fig 2 y con las siguientes condiciones iniciales y de borde. Para la ecuación de momento la velocidad es cero sobre todas las superficies y las derivadas de la velocidad son cero sobre los bordes imaginarios sobre zona extendida (se admiten discontinuidades en algunos puntos). Las condiciones de borde para la ecuación de la energía son las siguientes: en la pared activa se impone una temperatura, en el resto de las superficies se impone flujo de calor cero y en los bordes imaginarios de la cavidad extendida se impuso por razones de simplicidad flujos de calor cero. Esta última condición no causará problemas en el rango temporal de la simulación efectuada, es decir antes de que la pluma vertical que se forma fuera de la cavidad llegue al borde imaginario superior.

La forma adimensional de las ecuaciones 7 y 8 para el régimen de capa límite es la siguiente [9]:

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \underline{u} \nabla \underline{u} = -\frac{1}{(Ra/Pr)^{1/2}} \nabla P + T + (Ra/Pr)^{-1/2} \nabla^2 \underline{u} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla T = (RaPr)^{-1/2} \nabla^2 T \quad (10)$$

Donde tanto las variables dependientes como independientes son ahora adimensionadas y correctamente escaladas.

Método de solución

Se obtiene la solución numérica del problema precedente resolviendo las ecuaciones de discretización resultantes de aplicar el método de Galerkin y la técnica de elementos finitos. Se usó el programa SPONVEC de Pissanetzky y Carcaño [8]. La red de discretización se realizó con el programa ENREDO de Venere [11] y el post-procesamiento con el programa PITUCO de Venere y Dari [10]. El cálculo de los flujos de calor se hizo incorporando al programa SPONVEC la subrutina FLUJOS de Cardón [3].

RESULTADOS NUMERICOS

Se efectuaron corridas de simulación para $Ra = 1 \times 10^5$ y se está trabajando para obtener resultados para valores mas elevados.

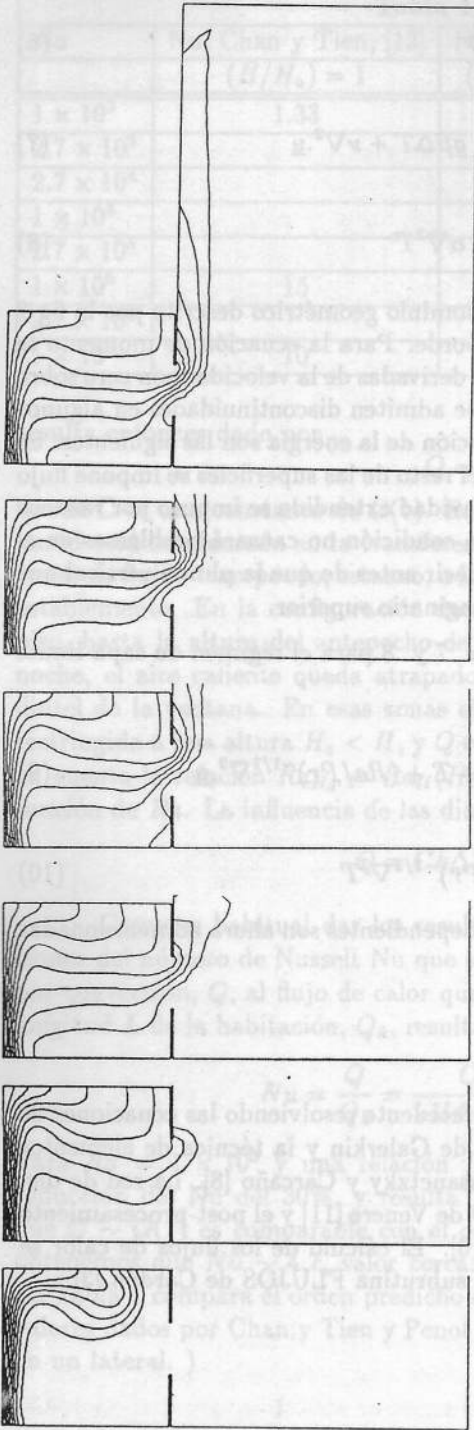


Fig. 4a. Evolución de una pluma convectiva hacia el exterior. Iso-
termas.

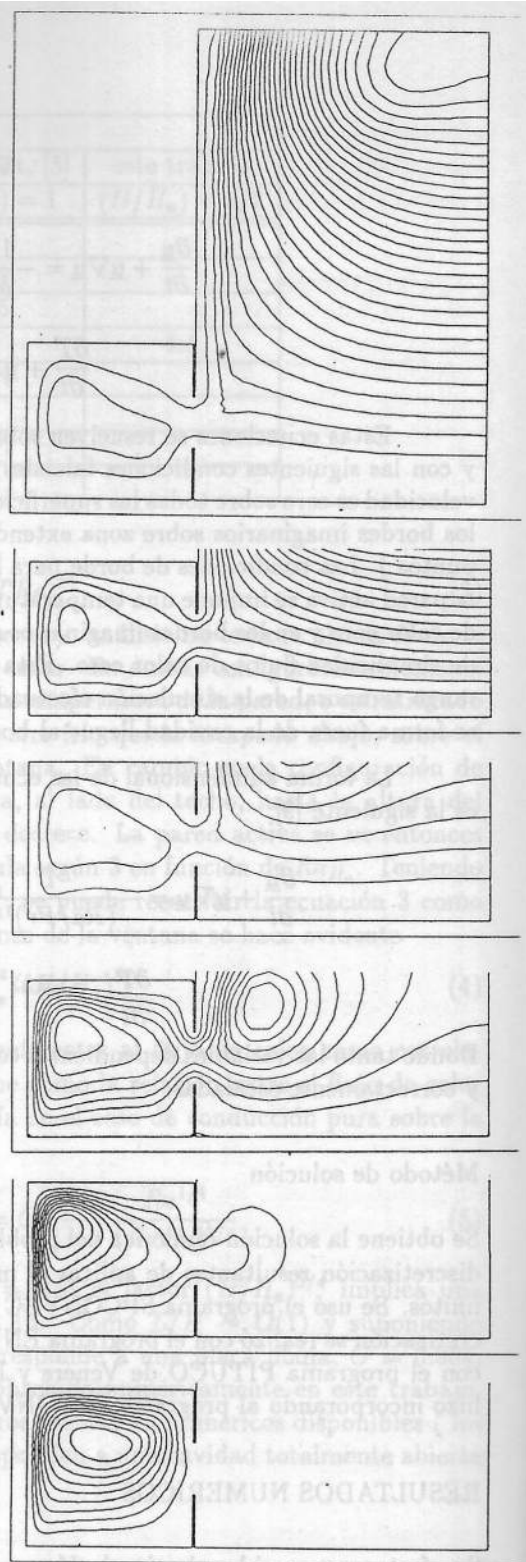


Fig. 4b. Evolución de una pluma convectiva hacia el ex-
terior. Líneas de corriente.

Las figuras 4a y b muestran la evolución de los perfiles de temperatura y de las líneas de corriente. Inicialmente la capa límite generada en la pared produce un movimiento de recirculación en el interior del recinto. La capa límite térmica avanza en pluma luego de ser desviada por el techo, hasta alcanzar la ventana. Cuando esto ocurre el flujo recirculante se extiende fuera del recinto. Allí el flujo se desarrolla hasta formar una zona de flujo horizontal entrante y una zona de flujo vertical ascendente al lado de la pared. La solución obtenida fuera de la cavidad presenta algunas características discutibles debido a las aproximaciones realizadas en sus bordes, no obstante no tiene mucha influencia en el patrón de flujo dentro de la cavidad ni en el flujo de calor intercambiado con el exterior.

La evolución de los perfiles de temperatura muestra una estratificación térmica en la cavidad, y hacia el final de la simulación, figura 4a.6 se observa una gran zona de temperatura constante, correspondiente a la zona de fluido estancado (gran separación entre líneas de corriente, como que muestra la figura 4b.6.) Es de opinión de los autores que para observar el comportamiento descrito en el análisis de escala será necesario extender el tiempo de simulación.

La figura 5 muestra la variación temporal del \overline{Nu} sobre toda la pared calentada. Para $\tau_{max} = 30$, es decir para el máximo tiempo alcanzado por la simulación, la curva \overline{Nu} vs. τ presenta todavía una pequeña pendiente, por lo que no podemos concluir que se halla alcanzado el estado estacionario. No obstante el \overline{Nu}_{est} no diferirá en más de un 0.01% del obtenido de manera que $\overline{Nu}_{est} = 4.4$. La figura 6 muestra el número de Nusselt promediado en seis secciones de la pared numeradas de 1 a 6 en sentido ascendente. El comportamiento relativo observado en los primeros instantes, $\tau < 3$ en donde el Nu se incrementa con la altura, cambia en la parte superior de la pared disminuyendo a hasta valores correspondientes $H/4$ para $\tau = 20$ y se mantiene en ese orden durante el resto de la simulación. Este comportamiento es atribuible al efecto de estancamiento del flujo en zona superior del recinto, y concuerda con el comportamiento predicho en el análisis de escala.

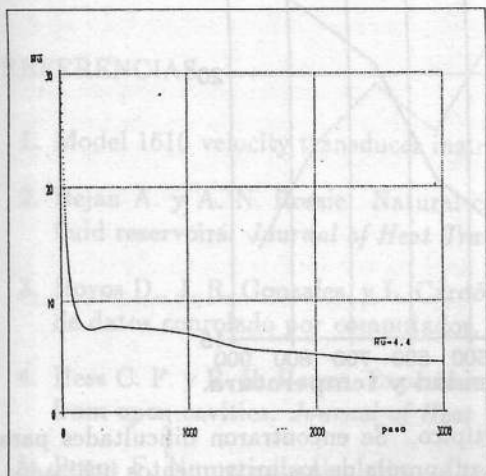


Fig. 5. Evolución del número de Nusselt medio.

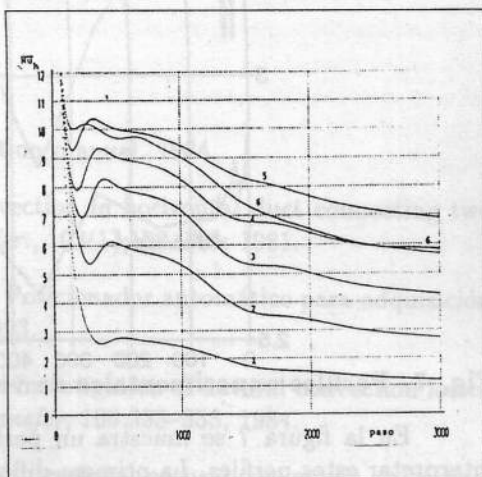


Fig. 6. Evolución del Nusselt local a diferentes alturas.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se obtuvieron experimentalmente perfiles de velocidad y temperatura sobre una línea vertical en el plano de una ventana que comunica una oficina del Dpto. de Física con el exterior del edificio. De ningún modo puede decirse que la configuración estudiada se asemeje geoméricamente a las situaciones ideales previamente revisadas o a la situación bidimensional bajo estudio. De todas maneras en el plano de la ventana deberían reproducirse las características del flujo saliente de cavidades abiertas revisadas anteriormente.

Las experiencias consistieron en abrir la ventana e inmediatamente, sobre su plano, comenzar un barrido de su línea vertical media registrando los valores de velocidad y temperatura a distintas posiciones. Las medidas de velocidad se tomaron con un anemómetro TSI Modelo 1610 [1] compensado en temperatura, que trabaja en el rango de 3cm/seg a 300cm/seg con un tiempo de respuesta de 1seg aproximadamente. Las medidas de temperatura se hicieron con termocuplas cobre constantán de muy baja inercia. El posicionamiento se hizo en forma mecanizada y conjuntamente con la adquisición de datos fue controlado por computador. Se dan mas detalles sobre este equipo en Hoyos y Cardón, [6]. En los primeros 20cm , desde el dintel de la ventana, se tomaron medidas muy poco espaciadas mientras que en el resto de la ventana el espaciamiento fue mayor. Las medidas se hicieron siempre en las primeras horas de la mañana a los efectos de que no hubiese brisas. Esta última comprobación se hizo en forma visual observando la ausencia de movimiento de las hojas de los árboles. El tiempo de la observación no fue mayor de una hora.

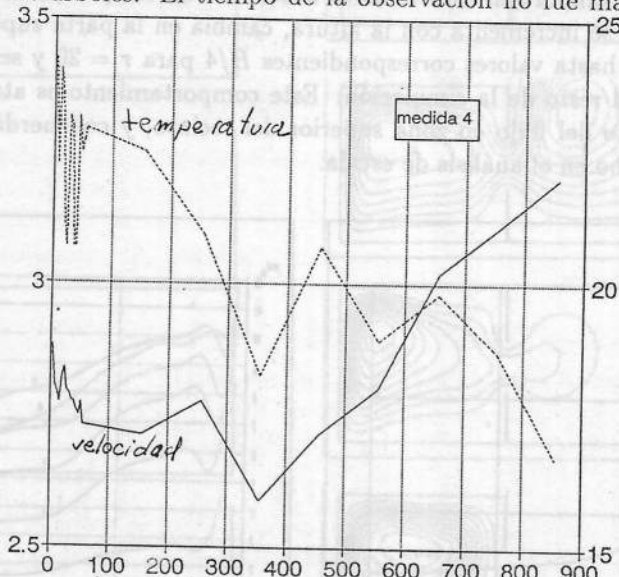


Fig. 7. Perfiles experimentales de velocidad y temperatura.

En la figura 7 se muestra un perfil típico. Se encontraron dificultades para interpretar estos perfiles. La primera dificultad, propia de los instrumentos utilizados, consiste en que la dirección de la velocidad no es un dato disponible, y debe ser inferida de la lectura del perfil de temperatura o de visualizaciones del flujo. El perfil de temperatura muestra una zona caliente cercana al marco de la ventana, indicando salida de aire, pero también muestra que el perfil sigue bajando en temperatura hasta

la parte inferior de la ventana, es decir que el aire frío del exterior entra por toda la ventana, en contradicción con las experiencias de Hess y Henze. El perfil de velocidad muestra también valores elevados en la cercanía del marco superior, y presenta un cero a los 36cm de aquel. Si usamos este punto para detectar el cambio de dirección, debería interpretarse que las velocidades entrantes son más elevadas que las salientes y también involucran todo el espacio de la ventana.

CONCLUSIONES

Se ha presentado el estado de avance de una investigación sobre la convección natural que tiene lugar entre cavidades abiertas (habitaciones con ventanas) y el ambiente exterior. Se muestra que, en el estado estacionario, el análisis de escala permite predecir correctamente el orden del número de Nusselt. La simulación numérica muestra la evolución general del flujo en dos dimensiones para $Ra = 1 \times 10^5$. Este Ra es pequeño comparado con los que se dan en habitaciones. No obstante los resultados numéricos para dicho Ra coinciden en orden con los de problemas parecidos mencionados en la literatura. Cálculos para Ra mayores están en marcha. Los resultados experimentales presentados muestran que en la parte superior de la ventana el comportamiento del flujo con algunos de los rasgos descritos por Hess y Henze. Para una comprensión mas completa se requiere de mediciones adicionales y visualización de flujo que se realizarán en el futuro. En relación a las cuestiones formuladas en la introducción, por ahora solo se dará una respuesta parcial. De lo expuesto se concluye: a) el problema es tridimensional, por lo tanto los resultados numéricos en dos dimensiones solo pueden mostrar algunos rasgos parciales del problema hidrodinámico, por ejemplo el estancamiento del flujo en la zona superior; b) como ocurre en otros casos donde la tridimensionalidad hidrodinámica no interfiere con la transferencia de calor gobernada por la capa límite, queda por comprobar si aquí ocurre lo mismo; c) se ha comprobado también que la medición de este caso elegido por su "sencillez" tiene grandes complicaciones, por lo que cualquier aporte de otra fuente resultará de utilidad.

REFERENCIAS

1. Model 1610 velocity transducer instruction manual. 1984.
2. Bejan A. y A. N. Rossie. Natural convection in horizontal duct connecting two fluid reservoirs. *Journal of Heat Transfer.*, 103(1):108-113, 1981.
3. Hoyos D., J. R. Gonzales, y L. Cardón. Posicionador automático para adquisición de datos controlado por computador. 1993.
4. Hess C. F. y R. H. Henze. Experimental investigation of natural convection losses from open cavities. *Journal of Heat Transfer*, 106:333-338, 1984.
5. Penot F. Numerical calculation of two-dimensional natural convection in isothermal open cavities. *Numerical Heat Transfer.*, 5:421-437, 1982.
6. Vénere M. J. y E. A. Darí. Generador de redes enredo. versión 5.0. manual del usuario. 1989.

7. Cardón L., D. Hoyos, G. Cancinos, y M. Lopez. Informe final del proyecto 252. convección natural y forzada en casas y edificios. 1993.
8. Mao C. P., A. C. Fernandez-Pello, y J. A. C. Humprey. An investigation of steady wall-ceiling and partial enclosure fires. *Journal of Heat Transfer*, 106:221-228, 1984.
9. Carca o R. Programa para el flujo transitorio incompresible en régimen laminar. su aplicación al analisis de pérdida de caudal de refrigeración del reactor ra6. 1983.
10. Ostrach S. Natural convection in enclosures. *Journal of Heat Transfer*, 110:1175-1190, 1988.
11. M. J. Vénere. Pituco, post-procesador de resultados en 2d. version 3.0.
12. Chan Y.L. y C. L. Tien. A numerical study of two-dimensional laminar natural convection in shallow open cavities. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28(3):603-612, 1985.