

## **CONVECCIÓN NATURAL EN UNA CAVIDAD: COMPARACIÓN DE UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA CON RESULTADOS EXPERIMENTALES**

María Vilte, Irene De Paul  
UNSa - INENCO<sup>#</sup>  
Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta  
TE: 87-255424  
E-mail: viltem@unsa.edu.ar

**RESUMEN.** Se empleó un programa convencional de simulación numérica del flujo producido por convección natural en el interior de una cavidad cúbica calentada desde una pared para comparar sus resultados con los obtenidos experimentalmente en el laboratorio. El programa usa el método de diferencias finitas y las condiciones de borde se fijaron de modo que coincidieran con las condiciones experimentales. De los resultados presentados en forma de isotermas y líneas de corriente se observan semejanzas y diferencias que muestran que es necesario mejorar el modelo numérico convencional de simulación para poder reproducir los resultados que se obtienen experimentalmente, incorporando más información experimental específica del problema.

**Palabras claves:** convección natural, simulación numérica, visualización de flujos, medidas térmicas

### **INTRODUCCIÓN**

El estudio de las características de la circulación que se establece en el interior de una cavidad cúbica debido al calentamiento desde alguna de sus superficies es un problema que es objeto de muchos trabajos de investigación tanto desde el punto de vista teórico como experimental y de simulación numérica, debido a su influencia en los procesos de transferencia térmica y ahorro energético (De Vahl Davies, G. 1983). Generalmente se emplean programas de simulación numérica con el objeto de dimensionar dispositivos aplicados al campo de las energías renovables basados en las ecuaciones dinámicas del sistema que no siempre reproducen los resultados experimentales.

En anteriores trabajos se presentaron los resultados experimentales obtenidos en ensayos realizados sobre un modelo pequeño que emplea agua como fluido convectivo, tanto en los aspectos térmicos (Vilte M., et al., 1998; De Paul I., Vilte M., 1999) como de visualización de flujos (Vilte M., De Paul I., 2000) en condiciones de calentamiento desde una pared vertical, manteniendo las restantes en contacto con el ambiente. Los resultados mostraron que los patrones de circulación cambian rápidamente al comienzo del calentamiento, estableciéndose dos circuitos de circulación que rodean un núcleo de mayor temperatura próximo a la pared caliente y otro más frío, ubicado sobre el piso y en las proximidades de la pared más fría, con una fuerte oscilación debajo del techo producida por el choque del flujo contra la pared fría. A tiempos largos desde el comienzo del calentamiento se observó que a pesar de haberse alcanzado el equilibrio térmico, los patrones de circulación siguen evolucionando lentamente.

Con el objetivo de comparar los resultados que se obtienen de un programa convencional (Kotake S., Hijikata K., 1993) de convección en una cavidad cúbica con los resultados experimentales obtenidos en laboratorio, se ajustaron los datos de entrada del programa a los valores de temperatura medidos en las experiencias y se compararon los perfiles de temperatura y los patrones de circulación obtenidos del cálculo con los medidos y visualizados en laboratorio. Con el fin de precisar la circulación en las mismas condiciones que se simularon, se repitieron experiencias de visualización de flujos empleando dos técnicas diferentes.

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

#### **Medidas de temperaturas**

El dispositivo experimental, consta de un recinto de  $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ m}^3$ , que contiene agua destilada como fluido que convecta. El calentamiento se efectúa a través de un calefactor que cubre una de las paredes laterales, la potencia aplicada es de 12.16 W. Los sensores son termocuplas que se ubican tal como se muestra en la Figura 2, en la que se visualiza que la superficie calentada del local es perpendicular a uno de los planos sensados del local. Las termocuplas guardan entre sí una distancia de 2 cm, y las de los extremos distan de las paredes 1 cm. El sensado se realiza desde 1 cm del piso. Las termocuplas son comandadas por un motor paso a paso que realiza un barrido vertical del recinto, y con un datalogger se registran las medidas de temperatura. La distancia vertical entre cada paso del motor es de 0.42 cm.

---

<sup>#</sup> Instituto UNSa - CONICET

También se cuenta con valores de temperatura en las paredes interiores y en el interior de la cavidad registrados en idénticas condiciones y citados en trabajos anteriores (Vilte M., et al., 1998; De Paul I., Vilte M, 1999).

Luego de una hora de iniciado el calentamiento, las condiciones de borde son:

$T_f=20.6\text{ }^\circ\text{C}$  en la pared fría  
 $T_c=21.3\text{ }^\circ\text{C}$  en la pared caliente  
 $T_i=20.9\text{ }^\circ\text{C}$  en el centro de la cavidad  
 El perfil térmico es el de la Figura 1

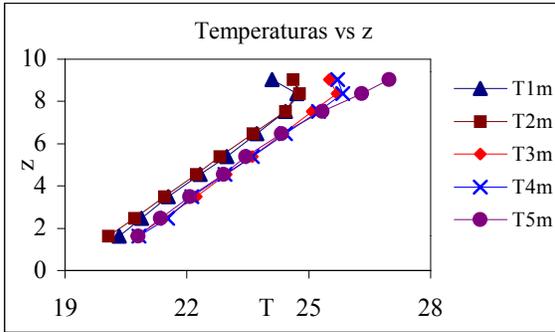


Figura 1. Perfil de temperaturas vs z

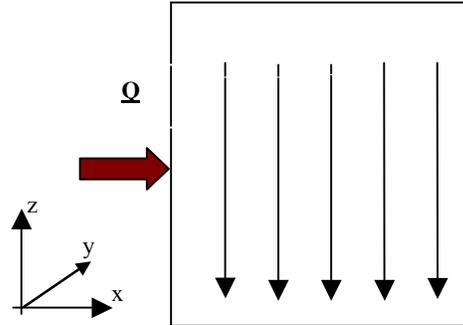


Figura 2. Medidas de temperatura en el plano x-z.

En la figura 1 se observa que la temperatura crece linealmente con la altura hasta la zona cercana al techo a 1 cm del mismo, los valores de temperaturas disminuyen, debido a las pérdidas a través del techo por conducción y debido a movimientos convectivos turbulentos en una capa delgada, cercana al techo. Los resultados de las medidas térmicas, muestran para este tiempo la formación de dos núcleos térmicos, uno caliente cerca de la pared caliente y otro frío cercano a la pared fría.

### Perfiles de velocidad

Para la visualización del flujo se recurrió a técnicas ya usadas anteriormente (Vilte M., De Paul I, 2000), (Figura 3a). La primera usando un láser de Argón de 3 W y como trazadores dentro del agua microesferas huecas de vidrio. Con una cámara se filmó la evolución del flujo a una hora de iniciado el calentamiento y por el espacio de alrededor de media hora. Como el movimiento es lento, se pasó luego la cinta a rápida velocidad, por lo que pudo realizarse un esquema del flujo en la cavidad.

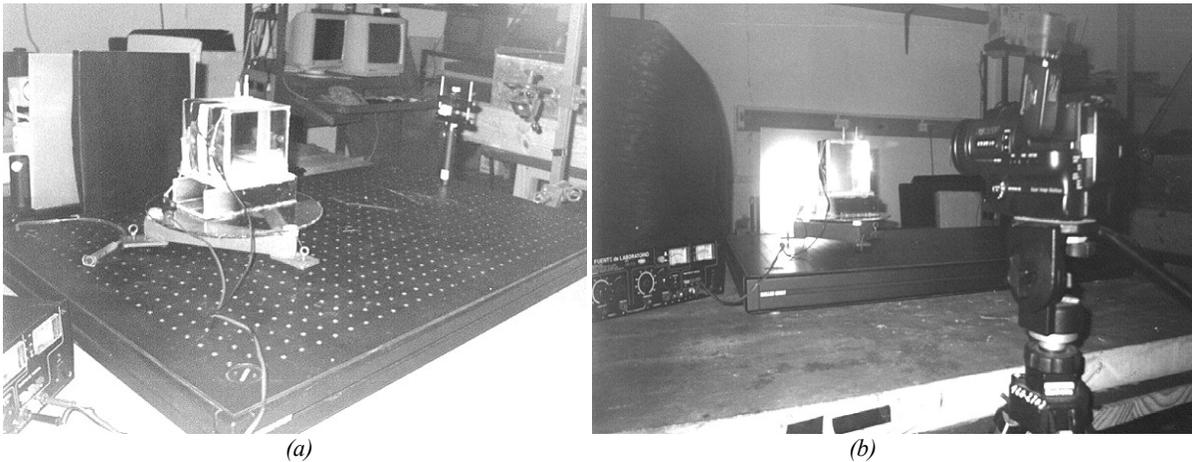


Figura 3. Dispositivo experimental para visualización empleando iluminación laser (a) y shadow (b).

También se filmó el movimiento usando la técnica de shadow (Figura 3b), usando como trazador permanganato de potasio. De este registro se pudo captar otras particularidades del flujo. Por ejemplo, el flujo que desciende cercano a la pared caliente antes de llegar al piso se desvía ligeramente hacia la pared fría y al llegar al piso cierra el ciclo formando un bucle con el agua fría que es arrastrada desde el piso hacia la pared caliente. Sobre la misma pared cerca del techo se observa la formación de un vórtice tan definido que deja una zona de flujo sin mezclar, de manera que se visualiza en determinadas zonas la ausencia de coloración. En el extremo inferior cercano a la pared fría se observa el movimiento suave del flujo desplazándose hacia la pared caliente. (Figuras 4 y 5, la superficie calentada es la izquierda).

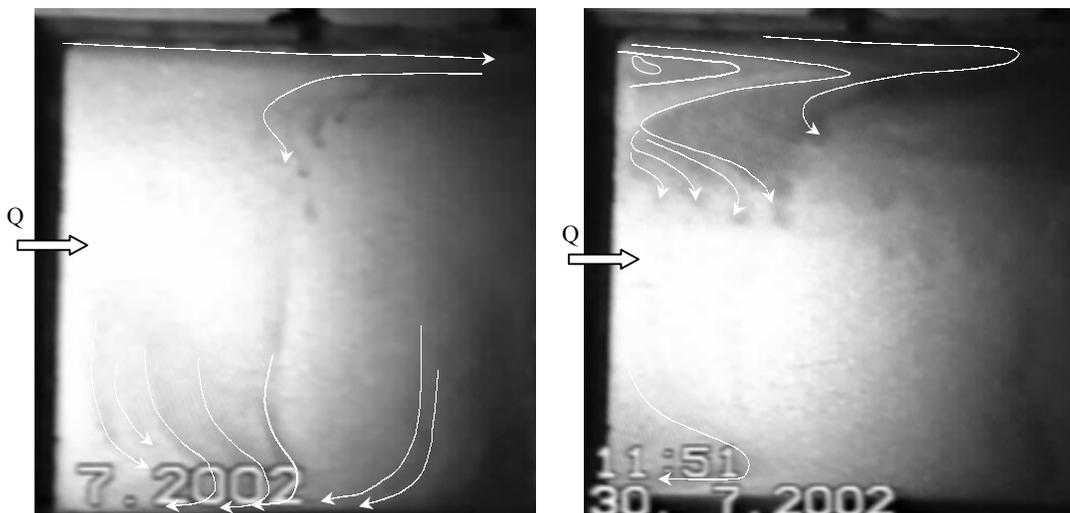


Figura 4. Visualización del flujo convectivo a tiempo  $t$ . Figura 5. Visualización del flujo convectivo a tiempo  $t+10\text{min}$ .

### DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA USADO

El programa usado, "CAVITYFL", elaborado por Kunio Hijikata y Susumu Kotake está escrito en lenguaje Qbasic, requiere como datos de entrada, el número de celdas en que se divide la región, la ubicación del calefactor y la superficie que abarca, el número de Grashof y el número de Prandtl, el tiempo entre iteración, el número de cálculos de velocidad, de temperatura y el número total de cálculos. Supone un movimiento bidimensional, lo que está de acuerdo con lo observado en nuestras experiencias anteriores (Vilte y Depaul, 1997), en los que por visualización de flujo y cálculo de velocidades se encontró que el flujo en el seno de la cavidad era aproximadamente bidimensional.

El programa produce resultados numéricos en forma de matrices y permite graficar la distribución espacial de la función corriente  $F(x,z)$ , la temperatura  $T(x,z)$  y la vorticidad  $W(x,z)$ . Gráficamente en la pantalla muestra los perfiles de velocidad  $U_z(x)$  y  $V_x(z)$ , la vorticidad  $W(x,z)$ , los perfiles de temperatura  $T(x,k)$  y  $T(k,z)$ , donde  $k=\text{constante}$ , las líneas isotermas  $T(x,z)$  y las líneas de corriente  $F(x, z)$ .

Dado que el paso del tiempo más conveniente a fin de evitar problemas de convergencia, es de 0.1 seg, se requiere mucho tiempo de cálculo si se procura comparar los resultados en estado estacionario. En el caso de nuestro sistema, el tiempo para alcanzar el estacionario es grande (Vilte M., et al., 1998; Vilte y De Paul I, 2000), por esta razón a los efectos de la comparación, se eligieron resultados experimentales determinados una hora después de iniciado el calentamiento.

### Condiciones iniciales y de contorno para el programa

El  $\Delta T$  en la definición del Gr es la diferencia de temperatura entre la pared caliente, en contacto con el calefactor,  $T_c$  y la pared fría, opuesta a la pared caliente,  $T_f$ . Los coeficientes que dependen de las propiedades del agua en convección se evalúan a la temperatura media en el interior del recinto,  $T_i$ .

$$Gr = \frac{g\beta(T)(T_c - T_f).H^3}{\nu(T)} \quad (1)$$

Por definición:

$$Ra(T) = Gr(T).Pr(T) \quad (2)$$

donde:

$$Ra(T) = K(T).H^3.\Delta T \quad (3)$$

y  $K(T)$  definido como:

$$K = \frac{g\beta\rho C_p\mu}{k} \quad (4)$$

usando el ajuste a las constantes físicas del agua en función de la temperatura:

$$K(T) = 1.08 \times 10^8 T^2 + 4.52 \times 10^8 T + 3.89 \times 10^8 \quad (5)$$

Para el cálculo del Pr se usa la siguiente expresión:

$$Pr = 10.717.e^{-0.0196T} \quad (6)$$

por lo que la expresión definitiva para la determinación del Gr es la siguiente:

$$Gr(T) = \frac{K(T).L^3 \Delta T}{Pr(T)} \quad (7)$$

Para una potencia constante de 12.6 W, a la hora de iniciado el calentamiento se tiene que:  $T_i=20.9$  °C,  $T_f=20.6$ ,  $T_c=21.34$   $Gr=1.55 \times 10^6$  y  $Pr=6.97 \approx 7$ , con lo que  $Ra \approx 1.08 \times 10^7$ . De los órdenes de magnitud de los números de Ra corresponden a un régimen de transición de laminar a turbulento.

El programa trabaja con las ecuaciones adimensionalizadas basadas en dos temperaturas de referencia  $T_o$  y  $T_r$  que, en el caso de condición de borde con flujo de calor  $q$  constante se definen de la siguiente manera:  $T_o = T_f$ , temperatura de la cara opuesta a la de calentamiento, y  $T_r = T_c = q \cdot H / \lambda$ , siendo  $H$  la longitud característica y  $\lambda$  la conductividad térmica del agua. La temperatura adimensional es entonces

$$T^* = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \quad (8)$$

El interior de la cavidad está discretizado con una malla de 25 x 25. Las variables espaciales adimensionales  $X$  y  $Z$  varían entre 1 y  $NX$ , y entre 1 y  $NZ$ , donde  $NX$  y  $NZ$  son el número total de celdas en las que se discretizaron las variables  $x$  y  $z$  respectivamente. La razón de aspecto de la cavidad es  $X/Z=1$ ; la zona que abarca el calefactor está definida por:  $X_{T1} \leq X \leq X_{T2}$  e  $Z_{T1} \leq Z \leq Z_{T2}$ . En nuestro caso el calefactor cubre toda la pared, por lo que  $X_{T1}=1$  y  $X_{T2}=NX$ , lo mismo en la dirección  $z$ ,  $Z_{T1}=1$  y  $Z_{T2}=NZ$ .

El programa comienza con las siguientes condiciones de borde, que coinciden con los valores medidos en la experiencia a  $t=1$  hr:

Temperatura:  $T^*(X,Z)=1$  en la pared caliente  $T^*(X,Z)=0$  en las demás paredes.

Esta última condición se mantiene a lo largo del tiempo a medida que el flujo evoluciona.

Función corriente (condición de no deslizamiento en las paredes):

$$F(1,Z)=0 \text{ y } F(NX,Z)=0 \quad F(X,1)=0 \text{ y } F(X,NZ)=0$$

$$\text{Vorticidad: } W(1,Z)=F(2,Z)/(aDX^2) \quad W(NX,Z)=F(NX-1,Z)/(2DX^2)$$

$$\text{Donde } DX=XY/NZ1 \text{ y } NZ1=NZ-1$$

### Resultados: perfiles de velocidad

Los perfiles de velocidad obtenidos por el programa son muy cambiantes con el tiempo, sin embargo se observa una periodicidad de 15 seg. De los perfiles determinados por el programa, el clásico que aparece en la mayor parte de la bibliografía (Elder, 1965, Ede, 1976, Bohm 1985) sobre el tema es el de la Figura 6 obtenido para  $t=4030$  s mientras que a  $t=4038$  s se obtiene el que se muestra en la figura 7.

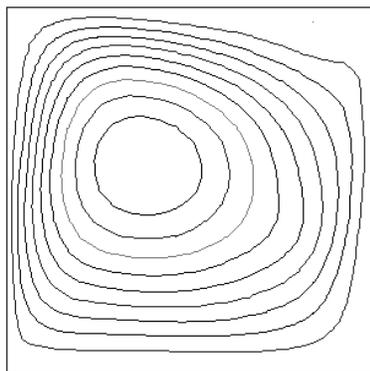


Figura 6. Perfil de velocidades a  $t=4030$  s

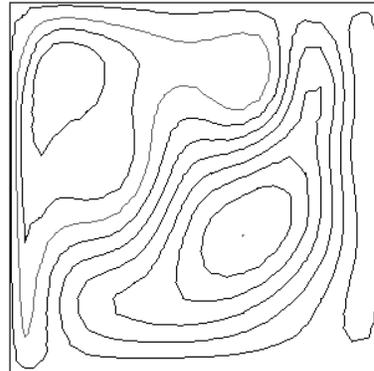


Figura 7. Perfil de velocidades a  $t=4038$  s.

**Resultados: perfiles de Temperatura**

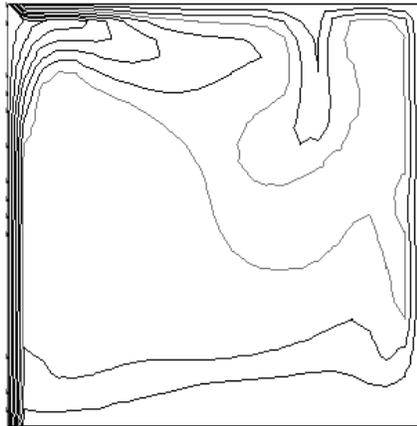


Figura 8. Líneas isotermas

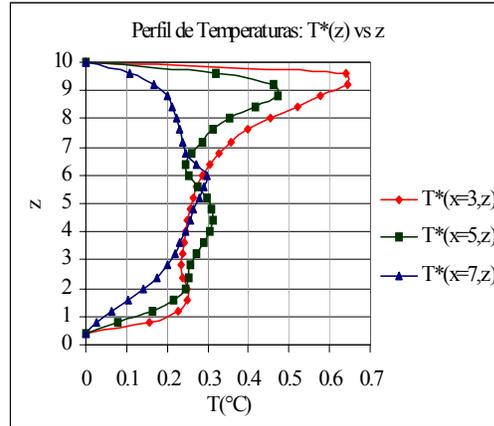


Figura 9. Perfil de  $T^*(z)$  en función de la altura

En la figura 8 se muestran las líneas isotermas en el plano xz y en la figura 9, el perfil de temperaturas de  $T^*(x,z)$  para  $x=3$  cm cerca de la pared caliente,  $x=5$  cm en el centro de la cavidad y  $x=7$  cm cerca de la pared fría. El perfil de temperatura muestra un crecimiento lineal hasta unos 2 cm de altura, con una pendiente que depende de la posición respecto de la pared caliente. Entre 2 y 6 cm de altura la temperatura es aproximadamente constante en las tres posiciones ( $T^* \sim 0.2$ ). Por encima de 6 cm hay un comportamiento claramente diferenciado en cada una de las posiciones, mostrando las más próximas a la pared caliente una fuerte oscilación ( $T^* > 0.5$ ).

**COMPARACIÓN DE LA SIMULACIÓN CON LA EXPERIENCIA**

A partir de la ecuación 8 se recuperan los valores dimensionales de temperatura calculados que, de esta manera, es posible compararlos con los perfiles de temperaturas obtenidos en el laboratorio. En este proceso se suavizan las oscilaciones observadas en  $T^*$ . En las figuras 10 y 11 se muestran los valores calculados por el programa de temperatura  $T(z)$  para  $x$  fijo frente a los valores medidos, con su margen de error. La comparación se establece para  $x=3$  cm cerca de la pared caliente y  $x=7$  cm cerca de la pared fría.

El perfil de temperatura  $T(z)$  coincide con lo que se observa experimentalmente dentro del error experimental, con un incremento casi constante con la altura. En el sistema real cerca del techo la temperatura disminuye. En la simulación la condición  $T^*=0$  en el techo determina este decremento. Las aproximaciones de la simulación para  $x=5$  cm ( $T_3$ ) y  $x=7$  cm ( $T_2$ ), son por arriba del valor medido, mientras que en la zona caliente  $x=3$  cm ( $T_4$ ) la aproximación es por debajo de los valores medidos.

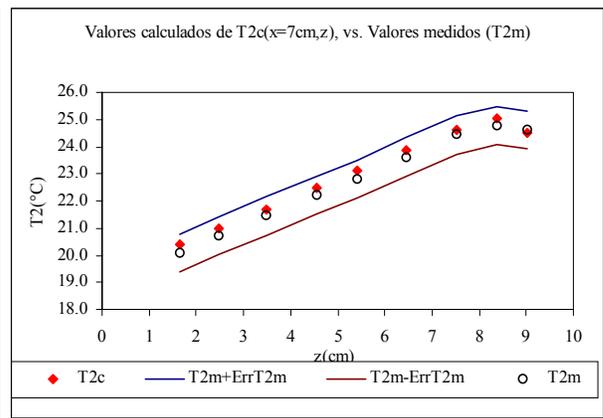
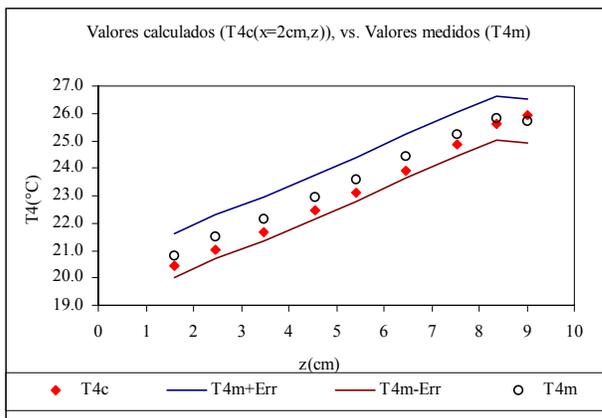


Figura 10. Valores de temperatura cerca de la pared caliente. Figura 11. Valores de temperatura cercanos a la pared fría.

Por otro lado, de la experiencia se sabe que una hora después de iniciado el calentamiento, el techo alcanza valores de temperatura  $T^*$  que oscilan entre 0.2 y 0.4. Se introdujeron estos cambios en las condiciones de borde del programa y los resultados obtenidos no producen una mejor aproximación a los resultados medidos. Cerca del techo los valores de temperatura calculados incluso tienden a alejarse más de los valores medidos.

El perfil de velocidades observado no coincide totalmente con ninguno de los determinados por el programa. Tal vez el que mejor se aproxima es el de la figura 7, donde se observan dos núcleos, uno cercano a la pared fría y otro que se extiende desde la pared caliente, pero no reproduce exactamente la fuerte oscilación por rebote contra la pared fría que se observa en la experiencia. En ésta lo que se observa es la formación de un núcleo caliente muy comprimido sobre la pared caliente, alrededor del cual el agua es arrastrada desde el piso hasta el techo donde se origina un vórtice muy definido. La mayor parte del agua que llega al techo se desplaza debajo del techo hacia la pared fría, allí se produce un rebote y parte del agua vuelve hacia la pared caliente siguiendo tres caminos: paralelamente al techo a dos o tres centímetros de éste, descendiendo luego cerca de la pared caliente hacia el piso; otra parte desciende por la pared fría hasta el piso, y finalmente también se observa un descenso por la región central de la cavidad en dirección inclinada hacia la pared caliente. En esta última zona es muy difícil captar nítidamente el perfil. La recirculación en la zona cercana a la pared fría no fue detectada visualmente en esta experiencia.

## CONCLUSIONES

- Los perfiles de temperatura obtenidos de la simulación se adecuan a los valores medidos en el laboratorio, dentro de los errores experimentales salvo en las proximidades del techo.
- El resultado del cálculo de temperaturas no muestra la formación del núcleo frío que se midió en las experiencias.
- Un aumento significativo en los valores de temperatura a partir de cierta altura con el consecuente aumento de la diferencia de temperatura entre la pared caliente y fría es coincidente con la experiencia.
- Los perfiles de velocidad calculados no coinciden totalmente a los observados. El perfil observado es muy complejo, está muy definido en las zonas cercanas a la pared donde se alcanzan los valores más altos de velocidad, pero es poco claro en la zona central, debido a la lentitud del movimiento. Ninguno de los perfiles arrojados por el programa parece coincidir con el que se establece en la cavidad.
- El programa empleado en la simulación no alcanza a reproducir los patrones de circulación observados, por lo que es necesario modificarlo procurando incorporar la información experimental obtenida.
- Se deben mejorar las técnicas de visualización del flujo convectivo en la cavidad, de modo de captar lo que ocurre en la zona central y en el extremo inferior cercano a la pared fría, donde el movimiento existe pero es muy lento.
- El flujo observado en las experiencias de visualización corresponde a un régimen laminar, que coincide con el modelo empleado en la simulación numérica tomada como comparación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bohm, M. S. Experimental study of three dimensional natural convection at high Rayleigh number. *SERI Report*. (1985).
- Burmeister. "*Convective heat transfer*". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983)
- De Paul I., Vilte M (1999)."Distribución de temperatura del agua que convecta en una cavidad cúbica". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente* 3, N°2, 65 - 68.
- De Vahl Davies, G. Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *Int. Journal for Numerical Methods in Fluids*, **Vol. 3**, 249, (1983).
- Ede, A. J. Advances in free convection. *Advances in Heat Transfer*, **Vol. 4**, 1, (1976).
- Elder, J. W. Laminar free convection in a vertical slot. *Journal of Fluid Mechanics*, **Vol. 23**, 77, (1965).
- Gill, A. E. The boundary layer regime for convection in a rectangular cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, **Vol. 26**, 515, (1966).
- Henkes, R.A.W.M., Lankhost, A. M. y Hoogendoorn, C. J., Structure of laminar natural convection flow in a square cavity heated from the side for infinitely large Rayleigh number. *Natural Convection in Enclosures, ASME, HTD – Vol 99*, 9, (1988).
- Khalighi, B., Braun, M. J., Freitas, C. J. (Editores) "*Flow visualization – 1989*". *ASME Transactions*, (1989).
- Kotake S., Hijikata K. (1993). Numerical Simulations of Heat Transfer and Fluid Flow on a Personal Computer. Pp 206-225. Elsevier Science Publisher B.V. Amsterdam, The Netherlands.
- Merzkirch, W. "*Flow visualization*". Academic Press Inc. (1974).
- Ostrach, S. Natural convection in enclosures. *Advances in heat transfer* **Vol 8** ,161, (1972).
- Vilte María y De Paul Irene. "Análisis de la interacción térmica e hidrodinámica en un recinto cerrado producida por convección natural". Actas de la XXa. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar. Rio Cuarto, Cordoba. (1997).
- Vilte M., De Paul I. y Mesa F. (1998)"Transferencia térmica en un recinto cerrado producido por convección natural". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente* 2,N°1, 2, 49- 52.
- Vilte M., De Paul I (2000). "Transferencia térmica por convección natural en un recinto cerrado en condiciones de equilibrio térmico y dinámico". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4 , 1, 2, 87-92.

## Abstract

The results of a conventional numerical simulation program for natural convection inside a cubic cavity heated from a side are compared with experimental results obtained at laboratory. The program employed the finite differences method and the boundary conditions were fixed in such a way that coincide with experimental conditions. Results are presented as isotherms and flow lines that show similarities and differences. This shows that it is necessary to improve the conventional numerical models for reproducing experimental results incorporating more experimental information specific of the problem.

**Key words:** natural convection, numerical simulation, flow visualization, thermal measurements.