

CONVECCIÓN NATURAL EN AIRE, MEDIDAS DE TEMPERATURA Y VISUALIZACIÓN DEL FLUJO

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

RESUMEN

A los efectos de comparar las características de la transferencia convectiva en aire y en agua se presenta el estudio del fenómeno de convección natural en aire en una cavidad cúbica calentada a través de una pared lateral con potencia constante. Se realizaron medidas de temperaturas en las paredes internas del recinto y en el centro de la cavidad, además de medidas de temperatura ambiente. Se visualizó el flujo empleando humo iluminado por un láser y se realizaron registros fotográficos digitales y con una cámara de video, la filmación del fenómeno. Se pudo describir la evolución del flujo en la cavidad y calcular algunos parámetros vinculados a la transferencia de energía en el recinto.

Palabras clave: temperatura, convección natural en aire, cavidad, humo, visualización de flujo

INTRODUCCION

En trabajos anteriores se estudió el fenómeno de convección natural en una cavidad llena de agua (Vilte y De Paul I, 2000, 2001 y 2003), en condiciones de calentamiento desde una pared vertical, manteniendo las restantes en contacto con el ambiente. Estos trabajos mostraron la gran inercia del sistema, perfiles de temperatura indiferentes frente a variaciones de la temperatura ambiente, grandes períodos de tiempo para alcanzar el estado estacionario (~8 a 12 horas), largos períodos de enfriamiento (~8 horas). La visualización del flujo en el estado estacionario sea dificultosa, ya que el movimiento es lento, se observa una gran estratificación de la temperatura dentro del local. El modelo ensayado es pequeño, de 0.10X0.10X0.10 m³.

Con el propósito de acercarnos a un caso más real, por ejemplo el de una habitación calentada por la luz solar se hace necesario incrementar el tamaño del modelo e intentar ensayar el aire como fluido que convecta y realiza la transferencia de energía dentro del local. Esto plantea varias dificultades en cuanto a la visualización del flujo, ya que en este caso lo más recomendable es inyectar humo en la cavidad. La obtención de humo que no sea tóxico y que entre al sistema, sin alterar el mismo no es sencillo. Por lo que consideramos que la técnica empleada en este trabajo es una primera aproximación a lo más adecuado.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

La cavidad ensayada es un cubo de 0.4X0.4X0.40 m³ cuyas paredes laterales y piso son de vidrio flotado de 3 mm de espesor. El techo es de acrílico del mismo espesor. La cavidad tiene una base de telgopor de 5 cm de espesor, por lo que se puede considerar que el piso está aislado. Una de las paredes tiene anexado un calefactor que cubre casi la totalidad de su superficie, las demás paredes laterales y el techo están en contacto con el ambiente. Una estructura de madera soporta la cavidad, esto está previsto para cuando se ensaye la cavidad con agua. Todo esto se muestra en la figura 1.

El calefactor es un devanado en constantán sobre una placa de fibra de vidrio de 0.4X0.4 m². La resistencia del calefactor es de 66 Ω y se conecta a una fuente que suministra tensión, de manera que la potencia de calentamiento que ingresa al sistema, es constante. Para aislar el calefactor eléctricamente se cubrió la superficie devanada con el constantán con una capa de aislante en aerosol. Para garantizar un calentamiento uniforme en la pared lateral de la cavidad, se empleó una placa de aluminio de 0.0011 m de espesor, cuya cara que da al calefactor fue recubierta con una capa de mica para asegurar el aislamiento eléctrico. A la placa de fibra de vidrio que soporta el calefactor fue anexada una placa de fibrocemento de 0.003 m de espesor de igual superficie que aísla el sistema, minimiza las pérdidas de calor al exterior y da rigidez. Las experiencias mostraron que este aislamiento no era suficiente por lo que para reducir las pérdidas térmicas hacia el exterior se anexó una placa de poliestireno expandido de 5 cm de espesor, lo que también se muestra en la figura 1.

Los sensores de temperatura empleados son termocuplas, construídas con hilos de cobre y constantán, recubiertas con teflón. Las mismas son conectadas a un sistema de adquisición de datos Omega, que registra las temperaturas cada 15 minutos. Los sensores se ubican en el centro de las superficies internas de la cavidad y para medir la temperatura alcanzada por el aire, se colocó una termocupla en el centro de la cavidad, esto se indica en la Figura 2.

Instituto UNSa - CONICET

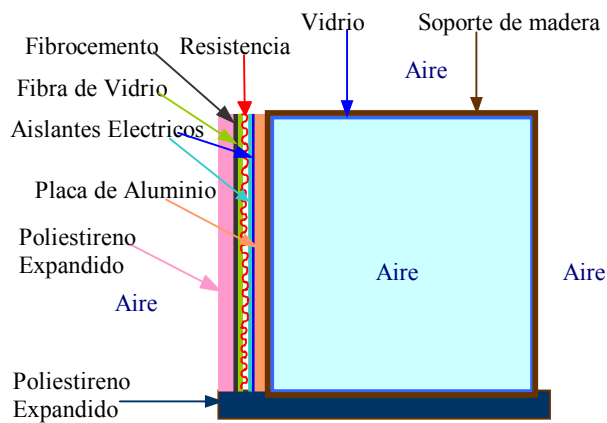


Figura 1. Esquema detallado del sistema ensayado.

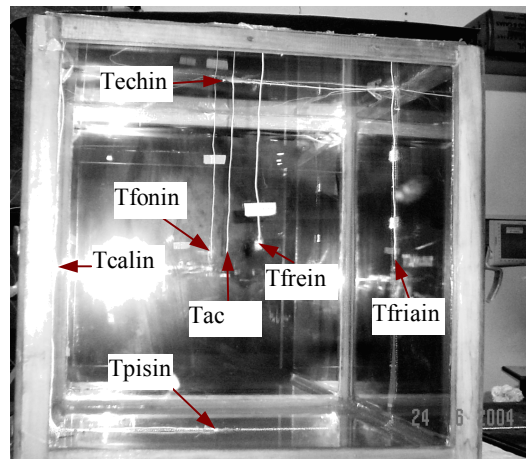


Figura 2. Distribución de los sensores de temperatura.

MEDIDAS DE TEMPERATURAS

Un primer objetivo de las medidas de temperaturas es la de estimar la inercia del sistema, es decir el tiempo en el que el sistema alcanza el estado estacionario. Se analizó para ello la evolución temporal de las temperaturas en la cavidad en los procesos de calentamiento y enfriamiento del sistema. Por esta razón se realizaron registros en periodos largos de tiempo, mayores que 24 hs.

De los valores experimentales obtenidos en las experiencias, se puede graficar su evolución en el tiempo como se muestra en la Figura 3. Se puede observar que el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el estado estacionario, es de alrededor de 7 horas. El tiempo que el sistema requiere para enfriarse desde el estacionario hasta que todas las superficies internas de la cavidad alcanzan la temperatura ambiente es aproximadamente el mismo. Esto se puede inferir de la gráfica mostrada en la misma figura.

Otro objetivo de las experiencias en el futuro es el de establecer una comparación con la convección natural en una cavidad cuando el fluido es agua, ya estudiado en trabajos anteriores. Para ello se tomó como parámetro la temperatura en la superficie interna de la pared caliente T_{calin} , que en el caso del agua para una potencia de 12.33 W ya ensayada ampliamente es de alrededor de 29 °C. Por lo tanto se ensayaron diferentes potencias a fin de obtener una relación entre esta y la temperatura T_{calin} alcanzada. Luego de un gran número de ensayos se determinó que para una potencia de entre 15 y 18 W y una temperatura ambiente de alrededor de 15 °C a 18 °C, se alcanza en la superficie interna de la pared caliente una temperatura (T_{calin}) que varía entre los 29 y 31°C, y este es el intervalo de potencia ensayada en la mayoría de las experiencias. Las variaciones dentro de los intervalos indicados de dependen de la temperatura ambiente, como luego lo analizaremos.

La notación usada para indicar las diferentes temperaturas en la cavidad es la siguiente.

- | | |
|---|---|
| T_{calin} : temperatura en el interior de la pared caliente | T_{frein} : temperatura en el interior de la pared del frente |
| T_{friain} : temperatura en el interior de la pared fría | T_{fonin} : temperatura en el interior de la pared del fondo |
| T_{techin} : temperatura en el interior de la pared del techo | T_{ca} : temperatura en el interior de la pared del frente |
| T_{pisin} : temperatura en el interior de la pared del piso | |

En el estado estacionario, se observa una gran diferencia entre la temperatura interna de la pared caliente T_{calin} y la temperatura de las demás superficies internas de la cavidad, se encuentra una diferencia $\Delta T \sim 10^\circ C$ a $12^\circ C$. La temperatura en superficie interna de la pared caliente es la más alta. Luego le sigue la temperatura del aire en el centro de la cavidad. En principio la temperatura del piso es la mas alta de las cinco paredes restantes, ello se explica ya que tiene una base de poliestireno expandido, y por lo que ya se dijo se puede considerar aislada. Las temperaturas de las superficies internas del resto de la cavidad son muy similares, ligeramente más alta la del techo, luego la de la pared fría y las más bajas se registran en la pared del fondo y del frente del recinto.

Al repetir las experiencias a lo largo de varias jornadas, se observó que se registran variaciones de las temperaturas en la cavidad que siguen a las variaciones de la temperatura ambiente o del laboratorio. Dichas variaciones en la temperatura ambiente no superan los 3°C. Esto se puede observar en la gráfica 3. En esta experiencia a partir de las 17 horas del segundo día se intercambié el sensor que mide la temperatura ambiente con el que mide la temperatura en la pared del frente, que es similar a la del fondo aunque algo más baja

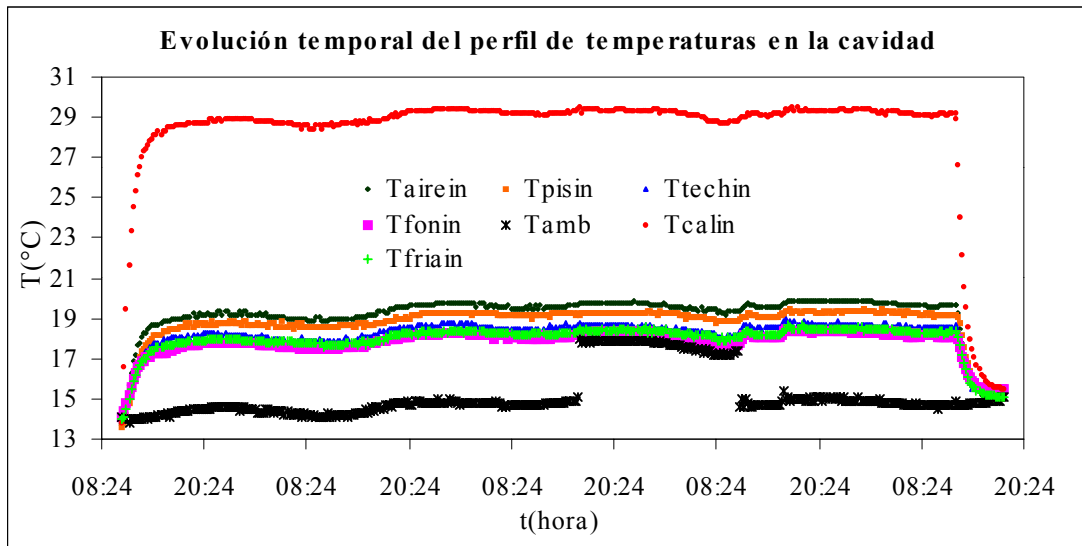


Figura 3. Evolución temporal de los valores de temperatura medidos experimentalmente en la cavidad en los estados de calentamiento, estado estacionario y periodo de enfriamiento.

Para determinar los coeficientes de la transferencia convectiva h en las superficies de la cavidad, se realizaron experiencias con sensores que miden la temperatura en la superficies externas de la cavidad. En las tablas 1 y 2 se muestran los valores promedios de temperaturas registrados en el centro de las superficies internas y externas de las paredes de la cavidad.

	Temperatura (C)
Tcalin	29,5±0,2
Tcalex	32,2±0,4
Tfriain	18,1±0,3
Tfriaex	17,9±0,3
Ttechin	18,6±0,2
Ttechex	18,0±0,2
Tac	19,4±0,4

Tabla 1. Valores promedios de temperaturas calculados en la dirección z.

	Temperatura (C)
Tfonin	17,9±0,2
Tfonex	17,8±0,3
Tfrein	17,6±0,3
Tfrenex	17,4±0,3
Tpisin	19,0±0,2

Tabla 2. Valores promedios de temperatura calculados en la dirección x.

Se observa que a medida que la potencia entregada es más alta, se establecen mayores diferencias de temperatura entre las paredes internas en el caso del techo, el frente y el fondo. Con estos valores se puede estimar los coeficiente de transferencia convectiva con la formula:

$$H = \frac{k}{e} A \frac{(T_{in} - T_{ex})}{(T_a - T_{in})}$$

k : conductividad del material de la pared de la cavidad, vidrio o acrílico

e : el espesor de la pared

A : la superficie transversal

T_{in} : la temperatura en la superficie interna de la pared de la cavidad

T_{ex} : la temperatura en la superficie exterior de la pared de la cavidad

T_a : la temperatura del aire en el centro de la cavidad.

Los valores de los coeficientes de transferencia convectiva se muestran en la siguiente tabla

Hcal (W/°Cm ²)	Hfria (W/°Cm ²)	Htech (W/°Cm ²)	Hfon (W/°Cm ²)	Hfren (W/°Cm ²)
45,5	26,8	52,2	11,6	19,4

Tabla 3. Valores del coeficiente de transferencia convectiva H , calculados en las superficies internas de la cavidad.

EXPERIENCIAS DE VISUALIZACIÓN

Para visualizar la convección en aire, se recurrió al humo, en este caso se practicó una perforación en el techo, que durante el calentamiento está perfectamente sellada. Después de alcanzar el estado estacionario, se abre y se inserta una vela encendida de incienso cuyo grosor coincide aproximadamente con el diámetro del agujero.

A simple vista se puede observar el movimiento del humo dentro de la cavidad, pero a efectos de analizar dicho movimiento en detalle, se iluminó el plano central perpendicular a la pared caliente con un láser y una lente cilíndrica que abre el haz. De modo que en forma más clara se observa la convección del humo introducido en la cavidad. Dicho movimiento se filmó para visualizar la evolución del flujo, además se realizaron también registros con una cámara fotográfica.

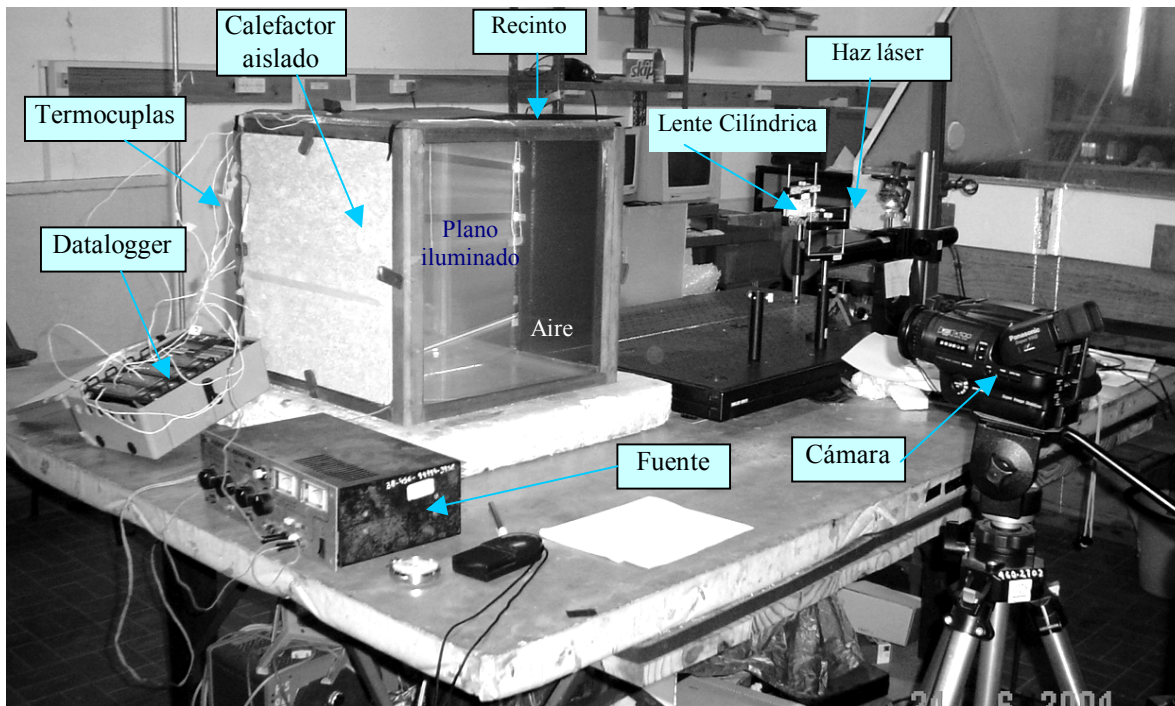


Figura 4. Dispositivo experimental para el estudio del sistema: sensores de temperatura, sistema de calentamiento y elementos empleados en la visualización de flujo.

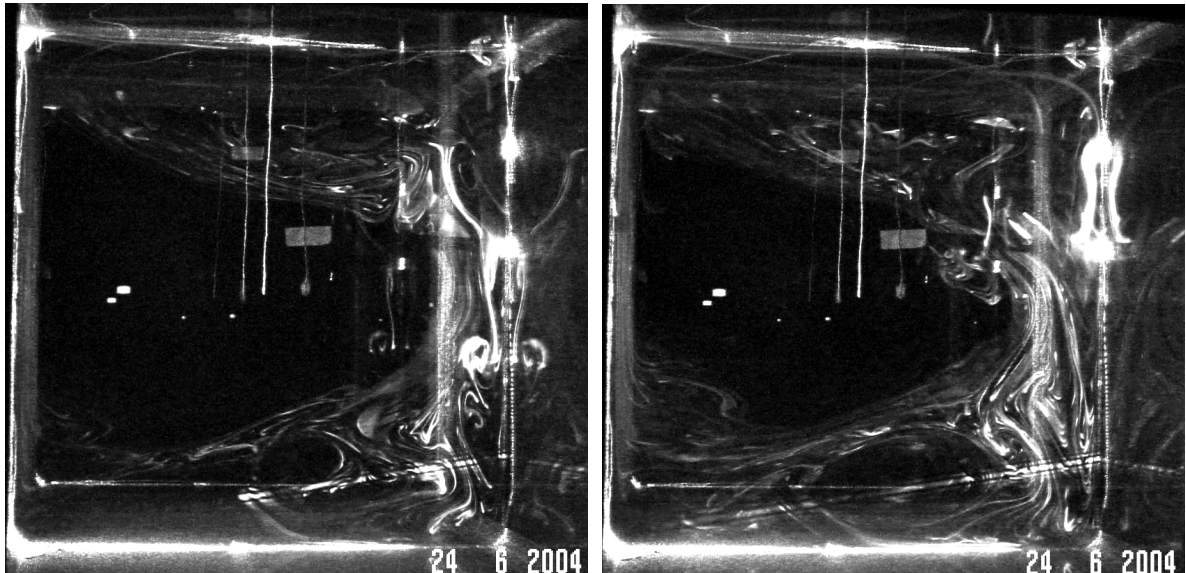
De la filmación se observa como el humo que entra por el extremo izquierdo del techo, es en principio arrastrado suavemente a lo largo del mismo hacia a la pared fría. Antes de alcanzar el extremo frío el fluido desciende en forma de remolino, de modo que se forman y disipan continuamente vórtices de recirculación en la zona en forma permanente. Así el flujo vuelve hacia la pared caliente a $1/5$ de altura desde el techo. Simultáneamente parte del humo que llega al extremo frío desciende sobre la pared fría rápidamente haciendo rulos y remolinos hasta el piso, pero en este descenso el humo es continuamente arrastrado hacia arriba, moviéndose y empujando el humo hacia el centro de la cavidad dirigiéndose hacia la pared caliente. Esta perturbación hacia la pared caliente forma una celda asimétrica que crece a medida que el tiempo transcurre. Desde la pared fría a lo largo del piso el humo se desplaza haciendo rulos y remolinos en el camino, se observa como el humo se desprende permanentemente desde el piso hasta la mitad de la cavidad formando remolinos que luego son arrastrados más suavemente hacia la pared caliente. Sobre esta superficie el flujo es arrastrado en forma casi laminar muy velozmente; en el extremo superior caliente el flujo cambia de dirección y se desplaza por el techo menos rápidamente. En principio el centro de la cavidad permanece inmóvil, luego se observa que sobre la pared caliente cierta altura, alrededor de $1/4$ H del piso una celda de flujo comienza a formarse en el sentido de las agujas del reloj y a medida que pasa el tiempo crece empujando el aire hacia el centro de la cavidad, tendiendo a encontrarse con la otra celda de mayor tamaño. A medida que esto ocurre se uniformiza el flujo, se pierde contraste, debido a los procesos de mezcla y difusión, lo que hace más difícil visualizar el movimiento del fluido. A lo largo de la pared fría, la actividad es continua e intensa, con la formación de vórtices y remolinos.

El desarrollo del flujo dentro del recinto es relativamente rápido y complejo, de la observación de la filmación se pueden estimar algunos tiempos que dan una idea de la velocidad dentro del recinto, en el techo una estela de humo tarda aproximadamente 6 segundos en recorrerlo. Al principio cuando la vela comienza a largar el humo, el tiempo desde que este se visualiza en la esquina superior derecha hasta que atraviesa la pared fría y llega al piso, el intervalo de tiempo es de alrededor de 12 a 15 segundos.

Se observa que el perfil del flujo es diferente en el caso de que el fluido es agua presentado en trabajos anteriores (Vilte y De Paul, 2000 y 2001). En primer lugar el movimiento es mucho más rápido lo que se justifica por la viscosidad del fluido. Por otro lado no se observan los vórtices en el extremo superior izquierdo, debajo del techo en la región adyacente a la pared caliente, allí se observa que el aire que sube por esta pared es uniformemente arrastrado hacia la pared caliente sobre el techo. La formación de remolinos es intensa sobre la pared fría, con la formación de vórtices debajo del techo y cerca del piso por

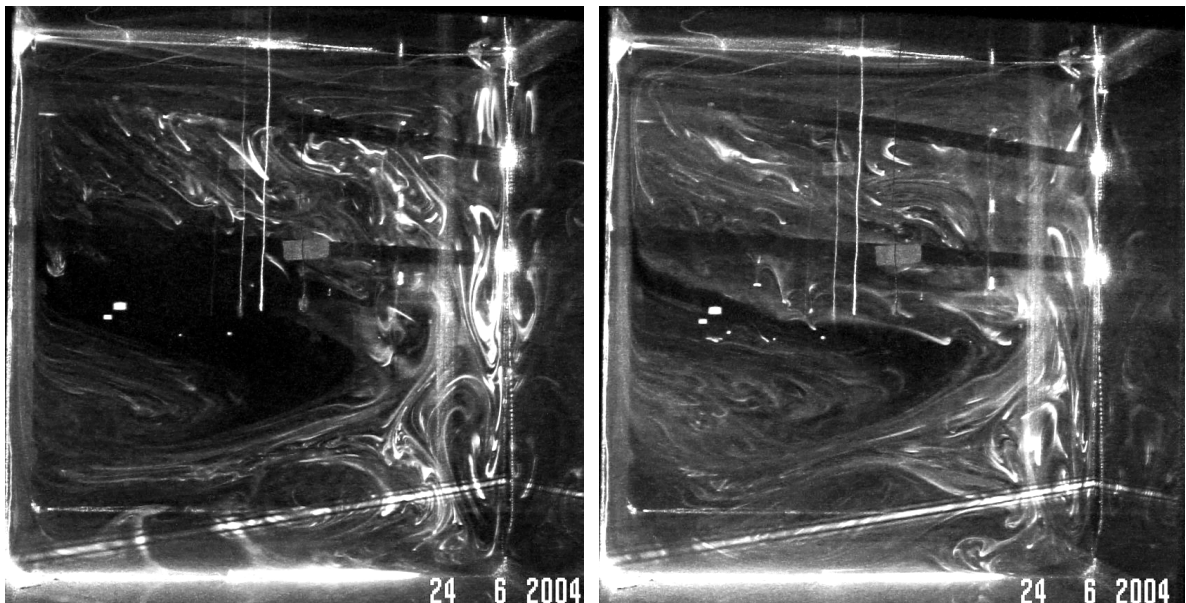
determinados períodos de tiempo y luego disipándose luego y formándose otros nuevamente. A lo largo de la pared se forma remolinos en los que el aire e llevado hacia arriba y hacia el centro de la cavidad nuevamente.

Se pueden establecer algunas comparaciones del desarrollo del flujo en agua y en aire. En el caso del aire no se observa el vórtice tan claramente definido que se cita en el trabajo (Vilte y De Paul I., 2002) cuando el fluido es agua. A diferencia de la convección en agua, la pared fría presenta una mayor actividad que la pared caliente, este comportamiento no se visualiza en el caso de que el fluido convectivo es agua, la zona de recirculación en el extremo inferior cercano a pared fría no se registra en el caso del agua. Es notable la diferencia en la velocidad del fluido debido a la diferencia de viscosidad entre el agua y el aire.



a)

b)



c)

d)

Figura 5. Registros fotográficos: a) $t= 21$ hs 15min 5 seg b) $t= 21$ hs 15min 50 seg c) $t= 21$ hs 16min 35 seg y d) $t=21$ hs 17min 20 seg. (los tiempos son calculados a partir de que se inicia el calentamiento)

CONCLUSIONES

Del presente trabajo podemos concluir:

1. Se determinó la constante de tiempo del sistema, se obtuvieron medidas de temperatura que permiten cómo se realiza la transferencia de energía por convección natural en un local en el caso de que el fluido que convecta es aire, calculando los coeficientes de transferencia convectiva H . En el futuro se plantearán experiencias con una mayor cantidad de sensores dentro de la cavidad para determinar con mayor precisión este coeficiente en las superficies del recinto.
2. La visualización del flujo, la filmación y los registros fotográficos permiten visualizar claramente el desarrollo del flujo convectivo dentro del local. Se observan zonas de mucha transferencia de régimen turbulento sobre la pared fría, zonas de reposo como la zona central, la formación de dos celdas que empujan el fluido hacia el centro de la cavidad en sentidos opuestos. La zona de mayor velocidad del fluido es la de la pared caliente.
3. La técnica de visualización del flujo empleada hace posible una descripción cualitativa del fenómeno. Se plantea para el futuro mejorar la técnica, de modo que la misma permita cálculo de velocidades, para lo que habrá que diseñar el sistema necesario para tal fin.
4. Se observan semejanzas y diferencias con los patrones de circulación observados en agua, en condiciones en que la temperatura de la pared caliente es la misma.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Ostrach, S. Natural convection in enclosures. *Advances in heat transfer* **Vol 8**, 161, (1972).
- 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).
- Bohm, M. S. Experimental study of three dimensional natural convection at high Rayleigh number. *SERI Report*. (1985).
- Tric E. et al. A First incursion into the 3D structure of natural convection of air in a differentially heated cubic cavity, from accurate numerical solutions. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000) 4043-4056.
- W.J. Hiller et al. Visualization of 3D natural convection-comparison with numerical results. In: Ed. Esp. da Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas Sao Paulo, Proc. of 11th ABCM Mech. Eng. Conf. Sao Paulo (Brasil), Dec. 1991, pp. 21-24
- 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).
- Clausing, A. M., Lister, L. D., Waldvogel, J. M. Combined convection from isothermal cubical cavities with a variety of side-facing apertures. *Journal of Heat and Mass Transfer*, **Vol.32**, 8, 1565, (1989).
- 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.
- Vilte M., De Paul I (2002). "Convección natural en una cavidad: Comparación de una simulación numérica con resultados experimentales". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 6, Tomo II, Sección 08.19-24.
- Vilte M., De Paul I. "Cálculo de los coeficientes convectivos y balance termico en el interior de una cavidad cúbica". *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*, revista de la Asociación Argentina de Energía Solar, Volumen 7, N° 2, Año 2003. ISSN 0329-5184. Sección 8, Pag. 19-23.
- Burmeister. "Convective heat transfer". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983)
- Merzkirch, W. "Flow visualization". Academic Press Inc. (1974).
- H. W. Wong. "Manual de formulas y Datos esenciales de TRANSFERENCIA DE CALOR PARA INGENIEROS". Geminis S.R. L. Buenos Aires. MCMLXXXI

ABSTRACT

To compare the characteristics of convective heat transfer in air and water, the results of the study of free convection of air in a cubic cavity, heated from a side at constant power are presented. Temperature measurements were performed on the internal surfaces and in the center point of the cavity. Visualization experiences were performed using smoke illuminated by laser to describe the evolution of the flow, employing photographic and video cameras. Some parameters relates to the energy transfer in the cavity were calculated.