

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROCESOS CONVECTIVOS  
EN RECINTOS CERRADOS: ESTADO DE AVANCE

I. De Paul, V. Javi\* y G. Lesino\*\*

INENCO#, Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

RESUMEN

Dentro del ámbito de aplicación de la energía solar, la transferencia de energía por convección natural es uno de los mecanismos más importantes; en particular es una herramienta fundamental en el diseño de sistemas pasivos. Esto es, no auxiliados por mecanismos convencionales como ventiladores, bombas, etc. Esta importancia se ve resaltada en los problemas de refrescamiento de viviendas en climas tropicales (cálidos y húmedos), donde se requiere un buen diseño térmico de los edificios para asegurar las condiciones mínimas de ventilación y confort de los habitantes.

Por estas razones, el INENCO decidió encarar el estudio experimental de la transferencia de energía por convección natural a escala de laboratorio, tendiendo a alcanzar un conocimiento más profundo de dicho proceso físico, lo que permitirá mejorar el diseño de viviendas asistidas por energía solar.

La transferencia de energía por convección natural está dada por el número de Nusselt, Nu, que es función del número de Rayleigh, Ra, del número de Prandtl, Pr y de la geometría del sistema (3), (4). El conocimiento de este conjunto de números adimensionales permite estudiar un proceso real a escala menor, en laboratorio. Los fenómenos de convección natural en aire permiten escalar el Ra y la geometría; no así el Pr, ya que la viscosidad del aire impone un factor de escala prácticamente de 1:1. Usualmente se trabaja en modelos a escala con distintos fluidos y se determina experimentalmente la dependencia del Nu con el Pr, para cada geometría .

Por esta razón, se decidió comenzar las experiencias con una configuración geométrica simple, un cubo de 40 cm de lado, con una cara caliente y otra fría, y empleando agua como fluido convectivo, a pesar de que el Pr no se puede escalar ( $Pr(\text{agua}) = 5$ ;  $Pr(\text{aire}) = 0.7$ ). Se inyecta colorante por la cara superior y se observa el movimiento convectivo del agua. El cubo tiene cuatro de sus caras con aislación fija y dos con aislación removible para permitir la observación visual y la toma de fotografías. Este diseño permitirá por una parte determinar las dificultades constructivas y poner a punto las técnicas de medida. Por otra parte, realizar un estudio cualitativo del movimiento del fluido por medio de la inyección de colorantes, y un estudio semicuantitativo por medio de la medición de temperaturas de las caras del cubo y del fluido en distintos puntos.

\* Becaria del CONICET

\*\* Investigador del CONICET

# Instituto UNSa. - CONICET

En el presente trabajo se describen las experiencias realizadas, los resultados obtenidos y se enuncian las propuestas de trabajo futuro.

## INTRODUCCION

En trabajos previos (1), (2), el INENCO realizó una clasificación bio climática de la zona del NOA con el fin de determinar los requerimientos térmicos, tanto de calentamiento como de refrescamiento de viviendas para llevarlas a condiciones de confort. Los resultados del mismo mostraron que hay zonas cálidas en las cuales es necesario refrescar las viviendas ya sea por medio pasivos o convencionales. Uno de los mecanismos pasivos posibles de refrescamiento es la evacuación de calor hacia el cielo por radiación nocturna basada en la convección natural en el interior de la vivienda. Por otra parte, la convección libre es uno de los mecanismos de transferencia de energía fundamentales dentro del campo de la energía solar en general. Por estas razones se decidió encarar el estudio experimental de la transferencia de energía por convección natural, a escala de laboratorio, procurando tener un conocimiento más profundo de dicho proceso, lo que permitirá optimizar el diseño térmico de las viviendas y eventualmente de algunos dispositivos solares pasivos que actúen por este mecanismo.

La convección natural es un proceso caracterizado por la geometría del sistema y un conjunto de número adimensionados (3): el número de Nusselt,  $Nu = hL/k$ , que es una medida de la transferencia térmica respecto de la que se tendría si el proceso fuera puramente conductivo; el número de Rayleigh,  $Ra = g \beta \Delta T L^3 / \nu \alpha$ , que da idea de la intensidad de la fuerza convectiva, y el número de Prandtl,  $Pr = \nu C_p / k$ , que es una medida de la rapidez con que se transporta impulso en fluido, comparada con la rapidez con que se transporta calor. En general se expresa:

$$Nu = f(Pr, Ra, \text{geometría})$$

Para cada configuración geométrica en particular es necesario determinar estos números adimensionados, y su conocimiento permite trabajar en modelos de laboratorio a escala menor.

Los fenómenos de convección libre en aire permiten escalar el Ra y la geometría; pero no ocurre lo mismo con el Pr ya que la viscosidad del aire impone un factor de escala de 1:1 (4). Sin embargo, la bibliografía muestra que la dependencia del Nu con el Pr es bastante débil, como resulta de repetir experiencias con distintos fluidos y por lo tanto con distintos Pr.

Por todas estas consideraciones se decidió trabajar con agua como fluido convectivo, aún cuando el Pr no se pueda escalar ( $Pr$  del agua = 5;  $Pr$  del aire = 0.7), y con una configuración geométrica simple a fin de determinar las dificultades experimentales.

El estudio de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista cualitativo, mediante la inyección de trazadores que pongan de manifiesto el movimiento del fluido, o desde un punto de vista cuantitativo determinando por medio de mediciones los campos de temperatura y velocidad en el seno del fluido, y la relación  $Nu = Nu(Ra)$  para cada geometría.

En el presente trabajo se realiza un estudio cualitativo y semicuantitativo, dado que al presente no se dispone de elementos que permitan determinar velocidades por medios no perturbativos. Una vez puesta a punto la técnica a emplear se realizará el ensayo en modelos a escala de las viviendas que se proyecta construir. Estos ensayos permitirán determinar los coeficientes de transferencia sobre las paredes a partir de una dada distribución de temperaturas en las mismas. Estos valores serán incorporados como datos a los programas de simulación de edifi-

cios ya existentes que generan la distribución de temperaturas sobre las paredes. Con estos valores se repite el ensayo en el laboratorio, etc. generándose un proceso iterativo entre el modelo computacional y el modelo de laboratorio que permita optimizar los coeficientes de transferencia para cada configuración de interés.

## DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El sistema consiste de un cubo de acrílico de 0,40 m de lado (fig. 1), enmarcado en madera. Una de las caras verticales se mantiene caliente mientras que la cara opuesta se mantiene refrigerada, imponiendo un salto de temperatura  $\Delta T$ . Las cuatro caras restantes están aisladas adiabáticamente; la aislación es removible para permitir la observación visual y la toma de fotografías.

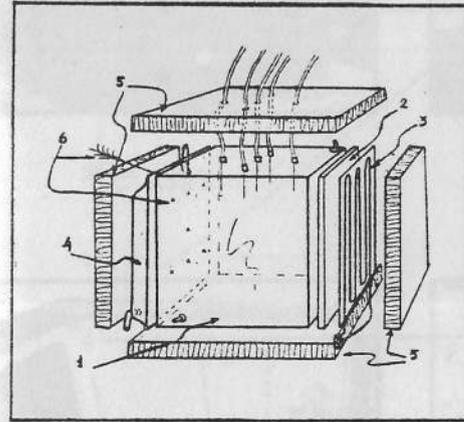


Fig. 1 Esquema del dispositivo experimental.  
1) Cubo de acrílico; 2) placa de aluminio; 3) calefactor; 4) tanque refrigerante; 5) aislación; 6) termocuplas.

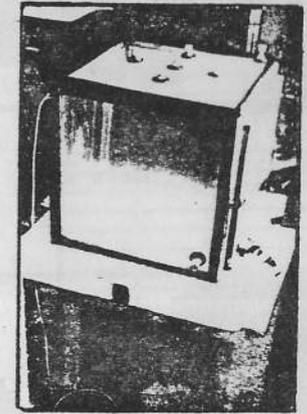


Foto 1

La cara superior tiene una serie de dispositivos destinados a permitir la inyección de colorantes en el cubo sin perder estanqueidad (foto 1).

Sobre la cara caliente se colocó un calefactor de constantán de  $63.2 \Omega$  de resistencia montado sobre un soporte rígido, que se aplica sobre una placa de aluminio aislada con mica. Esta placa conductora permite uniformizar la distribución de temperaturas sobre la pared de acrílico del cubo. Detrás del calefactor hay una placa de fibrocemento que le da rigidez (foto 2), una capa de fibra de vidrio y una placa de telgopor de 0,07 m de espesor como aislantes.

La cara fría tiene adosada un depósito de acero inoxidable (foto 3) por el que circula agua a temperatura inferior a la ambiente. Todo el sistema está aislado con placas de telgopor de 0,07 m de espesor (foto 4).

La temperatura de la superficie fría y caliente se mide con siete termocuplas distribuidas uniformemente sobre cada una de ellas. Para evitar que las termocuplas estén en contacto con la placa de aluminio caliente se las colocó sobre la cara interna del cubo y se las cubrió

con una placa de acrílico del mismo tamaño con perforaciones que dejan asomar la punta de la termocupla en las posiciones de interés; los orificios y las puntas se cubrieron con acrílico diluido (foto 5).

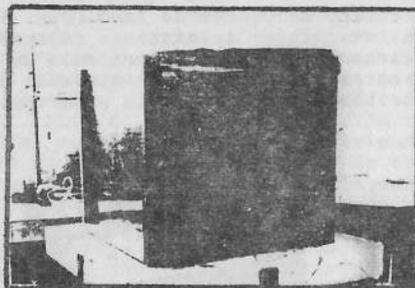


Foto 2

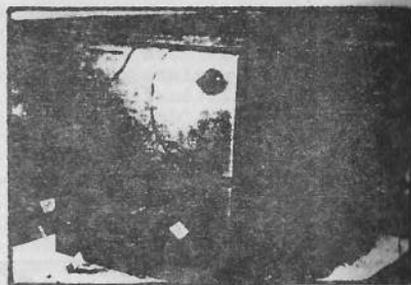


Foto 3

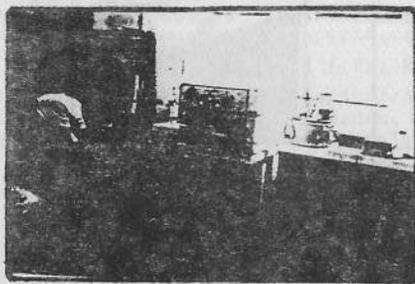


Foto 4

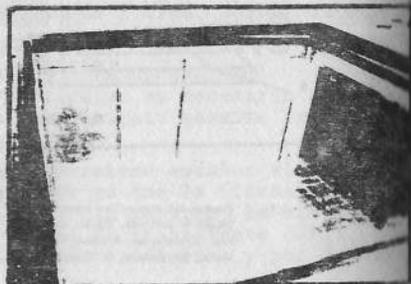


Foto 5

Como fluido convectivo se emplea agua hervida por lo menos durante un par de horas, para evitar que se formen burbujas de aire en el cubo.

El colorante a inyectar debe cumplir una serie de requisitos: en primer lugar debe dar buen contraste al tomar fotografías; debe tener una densidad tan próxima a la del agua como sea posible, ya que si es más densa se hunde y si es menos densa flota. Además debe ser inyectada a muy baja velocidad para no perturbar el flujo convectivo; idealmente debería ser inyectada con velocidad nula y ser arrastrada por el fluido en movimiento. Se hicieron ensayos con distintas sustancias recomendadas en la bibliografía y finalmente se decidió trabajar con la mezcla de 50% de tinta y 50% de colorante de cocina, por ser la que da mejor contraste y densidad más próxima a la del agua. Presenta el problema que

tinta difunde muy fácilmente. Para realizar la inyección se emplea un medidor volumétrico con un regulador manual de uso médico que permite regular el caudal de inyección hasta algunos  $\text{cm}^3$  por hora.

#### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las experiencias realizadas consistieron en suministrar distintas potencias al calefactor, esperar que el sistema alcance el estado estacionario y medir las temperaturas de la superficie fría y caliente y la temperatura en el interior del fluido; realizar inyecciones de colorante y observar el proceso convectivo.

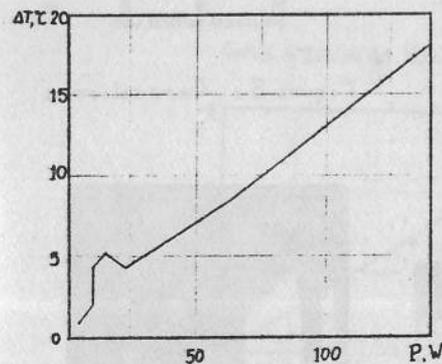


Figura 2

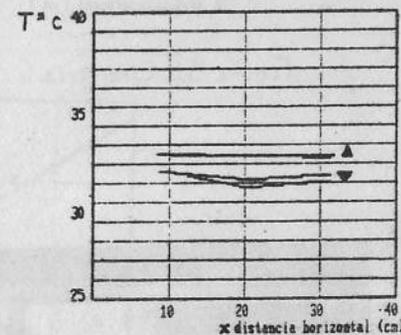


Figura 3a

▲ Caliente ▼ Fría

La figura (2) muestra la diferencia de temperaturas  $\Delta T$ , entre la cara fría y la cara caliente en función de la potencia suministrada. Se analizó también la uniformidad de temperaturas en las caras frías y caliente. La fig. (3a) muestra la variación horizontal de la temperatura en ambas caras, mientras que las figuras (3b) y (3c) muestran la variación de temperatura según el eje vertical. Se observa que la cara caliente es más uniforme que la fría. Esto es razonable ya que el sentido de circulación del agua en el refrigerador impone una cierta inhomogeneidad en la distribución de temperaturas.

Al inyectar el colorante se puede observar un flujo convectivo en la parte superior y en el fondo del cubo, mientras que la parte central muestra un núcleo bastante inactivo (foto 6). Recién al cabo de una o dos horas se observa un desplazamiento convectivo del núcleo coloreado (foto 7), más el efecto de difusión de la tinta que tiende a uniformizar el color del agua en tono rojizo.

Las pérdidas térmicas globales a través de la aislación se estiman en un 53% cuando la potencia entregada es de 10W, la diferencia de temperatura  $\Delta T$  es  $2^\circ\text{C}$ ; mientras que para una potencia de 135 W y un  $\Delta T$  de  $17.7^\circ\text{C}$ , las pérdidas representan un 11.4%.

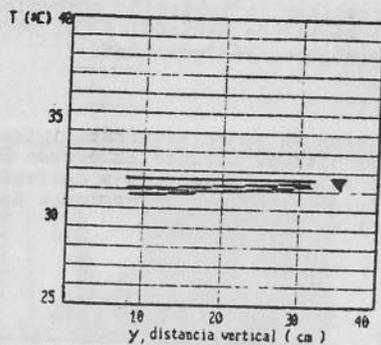


Figura 3b. Cara fría

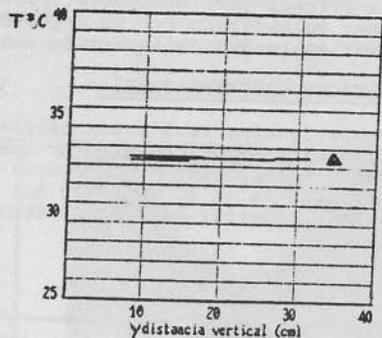


Figura 3c. Cara caliente



Foto 6

Arrastre convectivo y núcleo

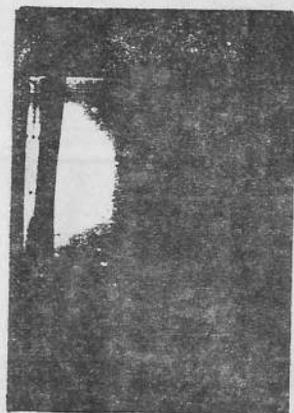


Foto 7

Desplazamiento del núcleo

#### DETERMINACION DE LOS NUMEROS NU Y RA

En la determinación de los números de Nu y Ra, el factor de escala para las longitudes es el lado del cubo  $L = 0,40$  m. Los parámetros que caracterizan al fluido:  $\rho, \kappa, \nu, c_p, \beta$ , son función de la temperatura, y se evalúan a un valor  $T_b$ , la temperatura global media que es el promedio de todas las temperaturas medidas sobre el sistema. Para el cálculo del número de Rayleigh el  $\Delta T$ , que se emplea es la diferencia entre la temperatura media de la cara caliente y la temperatura media de la cara fría:

$$Ra = g L^3 \Delta T_o (\rho \beta c_p / \kappa \nu)$$

$$\Delta T_o = \bar{T}_c - \bar{T}_f$$

Para la determinación del número de Nusselt,  $Nu = h L / \kappa$  el coeficiente de transferencia  $h$  se calcula con la siguiente relación:

$$h = Q / (A_w (T_w - T_b))$$

donde  $Q$  es la potencia suministrada a la cara de área  $A_w$  que se encuentra a una temperatura media  $T_w$ . En la figura (4) se muestran los resultados de las primeras medidas.

$ln(Nu)$  en función del  $ln(Ra)$

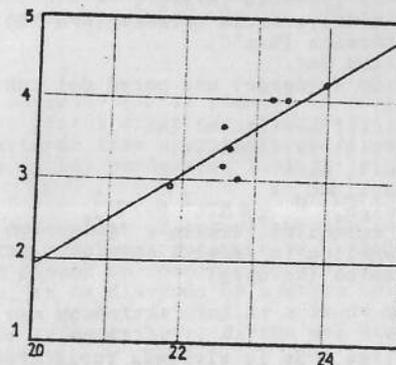


Figura 4

Se observa que los valores de Ra obtenidos ( $1,6 \cdot 10^{-9}$  a  $2,6 \cdot 10^{-10}$ ) son del orden de los Ra esperados en procesos convectivos en viviendas.

Los Nu obtenidos parecen coincidir con los valores que se obtienen en simulaciones numéricas para una configuración como la que se está ensayando; con un factor de forma  $A=1$ , (5), en la hipótesis de flujo bidimensional. De todas formas es necesario mejorar las medidas de temperaturas en las superficies, con el fin de dar resultados más concluyentes.

#### CONCLUSIONES

La experiencia adquirida nos permite mejorar el diseño del cubo, empleando en lo posible vidrio en lugar de acrílico, con el fin de tener un sistema más rígido y evitar reflexiones de luz y deformación de la imagen al tomar fotografías. Para fotografiar el flujo es necesario iluminar uniformemente el fondo y tomar fotos por contraste, dado que la iluminación directa genera muchas reflexiones que dificultan la ob

servación. Será necesario también ensayar estabilizantes para evitar la rápida difusión de la tinta.

Los dispositivos de bronce empleados para inyectar el colorante, si bien aseguran la estanqueidad y resisten la presión del agua, introducen muchas pérdidas térmicas, por lo cual será conveniente reemplazarlos por conectores plásticos de uso médico, más pequeños y no conductores.

Dado que estamos trabajando con un factor de forma  $A=1$ , los efectos de borde son notables y producen un movimiento tridimensional del fluido que influirá de alguna manera en el Nu. Es importante determinar los efectos tridimensionales dado que los movimientos convectivos en viviendas son esencialmente en tres dimensiones.

#### NOMENCLATURA

$C_p$  : calor específico (J/Kg°C)  
 $g$  : aceleración de la gravedad (m/seg<sup>2</sup>)  
 $h$  : coeficiente de transferencia térmica (W/m<sup>2</sup>°C)  
 $k$  : conductividad térmica (W/m°C)  
 $L$  : escala de longitud (m)  
 $Q$  : calor transferido a (desde) una pared del cubo (W)  
 $T$  : temperatura (°C)  
 $x$  : coordenada espacial horizontal (m)  
 $y$  : coordenada espacial vertical (m)  
 $Nu$  : número de Nusselt,  $hL/k$   
 $Pr$  : número de Prandtl,  $\mu C_p / k$   
 $Ra$  : número de Rayleigh,  $\frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} Pr$   
 $\beta$  : coeficiente de expansión térmica (°C<sup>-1</sup>)  
 $\nu$  : viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/seg)  
 $\mu$  : viscosidad dinámica (kg/mseg)

#### REFERENCIAS

1. Estudio del bioclima y de la vivienda rural tradicional en el noroeste argentino. L. Saravia y otros. Actas 7a. Reunión de ASADES p. 146, 1981.
2. Análisis del confort higrotérmico y evaluación de los recursos climáticos naturales en el NOA. G. Lesino y otros. Actas 8a. Reunión de ASADES, p. 49, 1983.
3. Física teórica. Volumen 6. Mecánica de Fluidos. Landau y Lifshitz. Cap. 5 pp. 207 - 248. Reverté S.A.
4. Experimental study of three dimensional natural convection at high Rayleigh number. Mark Bohn. SERI Report, Junio 1984.
5. Heat transfer rates in natural convection at high Rayleigh numbers in rectangular enclosures: a numerical study. M. Strada J.C. Heinrich; Numerical Heat Transfer, vol. 5, pp.: 81-93, 1982.