

## **SIMULACIÓN TÉRMICA BIDIMENSIONAL DE UN PISO RADIANTE**

**S. Flores Larsen<sup>1</sup>, L. Saravia<sup>1</sup>, G. Lesino, M. Condori, R. Caso, H. Suligoy y C. Fernández**  
INENCO - Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – U.N.Sa. - CONICET  
Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta Capital - Argentina  
Tel. 54-387-4255424, Fax 54-387-4255489, E-mail: seflores@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En el presente trabajo se realiza el estudio térmico bidimensional de un piso radiante. Se utiliza la similitud térmico-eléctrica para modelizar las transferencias de calor mediante el programa SIMUSOL, predecir el perfil de temperatura en el interior del piso y en su superficie y estimar los aportes energéticos por convección y radiación. Se describen a continuación las medidas realizadas entre el 5 y el 9 de agosto de 2006, en un prototipo de piso radiante que utiliza colectores solares para el calentamiento del aire, construido recientemente en dependencias del INENCO. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran la viabilidad del piso radiante como método de calefacción y la utilidad del modelo bidimensional utilizado para describir el sistema.

**Palabras clave:** piso acumulador, losa radiante, sistemas de calefacción, eficiencia energética, SIMUSOL.

### **INTRODUCCIÓN**

Los pisos acumuladores son pisos masivos que acumulan calor proveniente de la radiación solar directa o de algún otro sistema, como en el caso de los denominados “pisos radiantes”, que utilizan canales o conductos, incorporados al contrapiso o debajo de éste, por los que circula un fluido caliente, tradicionalmente agua (“sistemas hidrónicos”). La masa térmica del piso absorbe el calor del fluido y lo devuelve hacia el espacio a ser calefaccionado, por lo que la utilización de materiales densos como el hormigón, aumenta la performance térmica debido a su mayor capacidad de acumulación. Un 60% de la energía acumulada en el piso es transferida por convección, mientras que un 40% es transferida por radiación (Bilgen y Richard, 2002).

Trabajos de investigación recientes realizados en Australia, Turquía (Bozkir y Canbazoglu, 2004), USA, Canadá (Athienitis, 1997), Europa y Japón (Hisashi y Sadao, 1999) indican que este tipo de sistemas está teniendo cada vez más repercusión dentro del ámbito de la construcción de edificios energéticamente eficientes, por ser una alternativa económicamente viable y de rápida aceptación por parte de los usuarios. En la Argentina se utiliza losa radiante de tipo hidrónica con calderas para calentamiento de agua, sin tener en cuenta el consumo energético del sistema. No se tiene conocimiento del uso de este tipo de sistemas en edificios bioclimáticos, con diseños energéticamente eficientes, en los que el objetivo es alcanzar el confort térmico con el menor consumo de energía convencional.

Entre las ventajas de este tipo de sistema de calefacción podemos citar las siguientes:

- Mejora el confort térmico en los ambientes, puesto que el piso radiante genera un calor parejo y uniforme que se disipa lentamente hacia arriba. Se acerca mucho a la distribución ideal de calor en un ambiente, con menor asimetría de temperatura radiante, menor diferencia de temperatura vertical (entre los pies y la cabeza) y menor pérdida de calor por los pies debido a temperaturas de suelo más elevadas.
- Debido al aporte de calor radiante, la temperatura del aire en el local puede disminuirse en alrededor de 2°C, sin afectar el confort térmico (Givoni, 1976). Este efecto, sumado a menores pérdidas por infiltración y a reducciones en la pérdida de calor a través del techo debido a la menor estratificación del aire, permite ahorros energéticos del 15 al 30% respecto de un sistema tradicional, ayudando a reducir el consumo de combustibles fósiles.
- Si además se utilizan sistemas solares para calentar el fluido, se obtienen ahorros energéticos que pueden alcanzar el 90%. Los colectores solares se adaptan exitosamente al piso acumulador debido a que la energía acumulada en el piso durante las horas de mayor radiación es entregada al ambiente interior cuando la temperatura exterior es más baja y la necesidad de calefacción es mayor. Los colectores pueden adosarse a los muros o paredes del local a calefaccionar, con lo que no sería necesario contar con espacios exteriores extensos para ubicar los colectores. En días nublados, será necesario contar con un sistema de calefacción de respaldo.
- La calidad del aire se ve mejorada debido a que se eliminan problemas de polvo y suciedad en el aire ambiente asociados con los sistemas convencionales de calentamiento de aire forzados.
- El periodo en que la restitución al ambiente de la energía acumulada es máxima, usualmente entre 3 y 4 horas, puede ser controlado mediante el espesor de la capa de hormigón y las características radiativas superficiales del piso (Magyari y Keller, 1998).

---

<sup>1</sup> Investigador de CONICET.

Si se utiliza aire como fluido caliente, es posible evitar las frecuentes pérdidas de líquido en los conductos y problemas de humedad y se amplía el tipo de materiales con posibilidad de uso: los conductos pueden ser plásticos o metálicos, placas de acero corrugado o bloques de hormigón huecos prefabricados formando canales, con lo que se puede simplificar la instalación del sistema y disminuir los costos. El uso de aire en reemplazo del agua ha suscitado mucho interés en Europa, EEUU y Canadá (Ren y Wright, 1998) e inclusive se estudió la forma de acoplarlo a sistemas convencionales de aire caliente (Koschenz y Dorer, 1999) y a sistemas automáticos de control (Choa y Zaheer, 1999; Kuznetsov, 1997). Actualmente se encuentra en el mercado europeo un bloque prefabricado cuyo ensamblaje forma canales de aire, denominado TermoDeck, que ha demostrado tener excelente aceptación en el ámbito de la construcción (Barton et al., 2002).

En Argentina, existen trabajos previos realizados durante los '80 en el INENCO en el tema de pisos acumuladores con colectores de aire (Lesino et al., 1984), en los cuales se utilizaron modelos simplificados de transferencia de calor. Además, se hicieron ensayos en un prototipo en el que se utilizó el techo como colector solar (sin cubierta), a fin de evaluar su potencial como módulo fácilmente adaptable a construcciones en viviendas (Gríon et al., 1983). La bibliografía existente actualmente no permite contar con una herramienta de diseño y simulación de este tipo de sistemas que permita predecir su comportamiento ante variaciones de diferentes parámetros como la profundidad de los conductos, espesor de la aislación a utilizarse, diámetro y espaciamiento óptimos de los conductos, velocidad del aire, emisividad del piso, etc. La falta de datos y la escasez de aplicaciones concretas por parte del sector de la construcción condicionan el uso de este tipo de sistemas de calefacción alternativos.

En el presente trabajo se utilizó la similitud térmico-eléctrica para modelizar las transferencias de calor mediante el programa SIMUSOL. Dicho programa permite trabajar con transferencias de calor conductivas, convectivas y radiativas. En general, la mayoría de los modelos simplifican la transferencia radiativa debido a que introduce alinealidades de difícil manejo en las ecuaciones. Debido a que, como se mencionó anteriormente, aproximadamente un 40% de la energía del piso es transferida por radiación, es imprescindible contar con un modelo que permita trabajar con transferencia radiativa, lo cual no es un problema para SIMUSOL, que cuenta con algoritmos modernos y veloces para la resolución de este tipo de modelos. A continuación se describen las medidas realizadas en un prototipo construido recientemente en dependencias del INENCO, que utiliza colectores solares para el calentamiento del aire. Los resultados obtenidos indican la viabilidad de este sistema como método de calefacción.

## MODELIZACIÓN DEL PISO ACUMULADOR

### Breve descripción del modelo térmico utilizado con SIMUSOL

En la Figura 1 se puede ver un esquema del piso acumulador estudiado, de 30cm de espesor. Un conducto colector rectangular a la entrada y otro a la salida es el encargado de distribuir el aire caliente entre conductos circulares. En este caso la conexión de los conductos es del tipo paralelo, menos común que la conexión en serie utilizada por los sistemas hidráulicos, pero de mayor eficiencia cuando el fluido caloportador es aire (Bozkir y Canbazoglu, 2004). Para disminuir las pérdidas térmicas hacia el suelo y los laterales, el piso cuenta con aislación térmica (Figura 2). A fin de estudiar la distribución de temperatura en el piso, se utiliza un modelo bidimensional, como se muestra en el corte transversal de la Figura 2, en donde se observa la discretización realizada: cada rectángulo está asociado a un nodo, cuya evolución de temperatura se desea conocer. Se supone que el piso es lo suficientemente extenso como para que las condiciones de borde no sean significativas. Debido a la simetría del sistema y para reducir el número de nodos a utilizar, se trabajó con una zona que incluye un único conducto (resaltada en la Figura 2 con un rectángulo de trazo grueso) para la cual se pueden suponer límites laterales adiabáticos. A fin de estudiar los efectos del espesor de la aislación inferior, no se supusieron condiciones adiabáticas en el límite inferior sino que se discretizó la capa correspondiente al poliestireno expandido. Por debajo de dicha aislación se supuso que la transferencia de calor es puramente conductiva, hacia un único nodo con temperatura fija (temperatura de suelo).

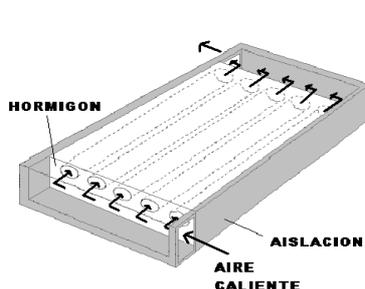


Figura 1: Esquema del piso radiante y los conductos.

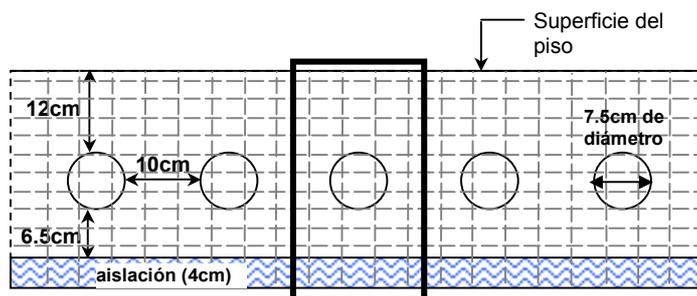


Figura 2: Discretización del piso y zona simulada.

Un esquema del símil eléctrico para circuitos térmicos, utilizado para ingresar el modelo a SIMUSOL, se muestra en la Figura 3 para un nodo superficial. Cada nodo del piso posee una inercia térmica que se tiene en cuenta a través de un capacitor (caracterizado en SIMUSOL por su masa y su calor específico). Los nodos superficiales intercambian calor a través de procesos conductivos (con los nodos vecinos), convectivos (con la temperatura del local) y radiativos (con la temperatura media radiante), por lo que cada nodo superficial está conectado con sus vecinos (laterales e inferior) mediante resistencias térmicas conductivas (caracterizadas a través de la conductividad, área de transferencia y espesor del nodo), y con el aire del local a través de una resistencia convectiva (caracterizada por un coeficiente convectivo y un área de transferencia). El

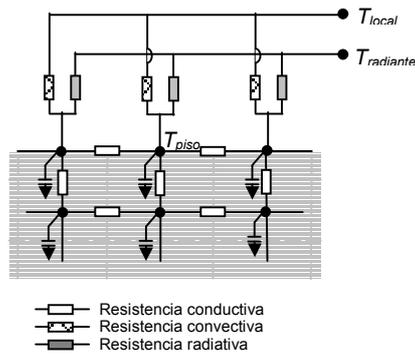


Figura 3: Circuito eléctrico.

coeficiente convectivo  $h_{piso}$  utilizado para la transferencia de calor entre la superficie del piso y el aire del local fue calculado a partir de los números de Nusselt y Rayleigh mediante las siguientes expresiones (Incropera y DeWitt, 1996):

$$Nu_L = h_{piso} L / k; \dots Nu_L = 0.54 Ra_L^{1/4}; \dots Ra_L = (g\beta/\nu\alpha) (T_{piso} - T_{local}) L^3 \quad (1)$$

en donde  $g$  es la constante gravitacional ( $9.81\text{m/s}^2$ ),  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica ( $\beta=1/T$ ),  $\nu$  es la viscosidad cinemática del aire,  $\alpha$  el coeficiente de difusión térmica,  $k$  la conductividad térmica del aire,  $L$  la longitud característica ( $L=A_{piso}/P_{piso}$ ),  $A_{piso}$  el área total de piso y  $P_{piso}$  su perímetro. En una primera aproximación, se considera que el coeficiente convectivo del piso es constante, con lo que las propiedades termofísicas del aire se evalúan en una temperatura media  $T_{media} = (T_{piso} + T_{local})/2$ , con  $T_{piso}$  y  $T_{local}$  las temperaturas promedio del piso y del aire del local, respectivamente.

El coeficiente convectivo para la transferencia de calor entre las paredes del conducto y el aire que circula por el mismo se calculó mediante la correlación de Dittus-Boelter para flujo en conductos:

$$Nu_{D_{conducto}} = 0.023 Re_{D_{conducto}}^{0.8} Pr^{0.3} \quad (2)$$

en donde las propiedades termofísicas se evaluaron a la temperatura del aire del conducto. En este caso el número de Reynolds se calculó como  $Re = m D_{conducto} / A_{conducto} \mu$ , con  $m$  el flujo de aire en  $\text{kg/s}$ ,  $A_{conducto}$  y  $D_{conducto}$  el área transversal y el diámetro del conducto, respectivamente.

En una primera aproximación y para estudiar el efecto de calentamiento del piso, se supuso que el aire del local está a una temperatura constante y que las superficies de las paredes y techo del local se encuentran a esta misma temperatura, por lo que la temperatura radiante es la temperatura del aire interior. Las resistencias radiativas se caracterizan mediante el área, la emisividad y el factor de forma. Cuando se incorpore el modelo térmico para el local, la temperatura del aire del local y la temperatura radiante será calculada por el mismo programa.

#### Resultados del modelo para temperaturas de aire constantes

Para realizar una primera aproximación del comportamiento térmico del piso se supusieron valores constantes para la temperatura del local, para la temperatura del aire que fluye en los conductos y para los coeficientes convectivos involucrados. Estas simplificaciones permiten comprender mejor cómo es la transferencia de calor en el sistema. Los valores de temperatura adoptados son los siguientes: el aire que fluye por los conductos ingresa a una temperatura constante de  $40^\circ\text{C}$ , la temperatura del local se mantiene constante en  $4^\circ\text{C}$  (valor arbitrariamente bajo a fin de evidenciar el aporte de calor del piso), la temperatura de la superficie de la tierra por debajo de la aislación se mantuvo en  $5^\circ\text{C}$  y la temperatura inicial del contrapiso se supuso de  $10^\circ\text{C}$ . En cuanto a los coeficientes convectivos, el valor de  $h_{piso}$  obtenido mediante la ecuación (1) fue de  $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ , que corresponde a una temperatura media del piso de  $18^\circ\text{C}$ . Este valor puede variar ligeramente entre  $2.4$  y  $3.2 \text{ W/m}^2\text{C}$ , según la temperatura de piso considerada. La estimación para el coeficiente convectivo  $h_{conducto}$ , a partir de la ecuación (2) y para un flujo másico  $m$  de  $0.4\text{kg/s}$  es del orden de  $200\text{W/m}^2\text{C}$ .

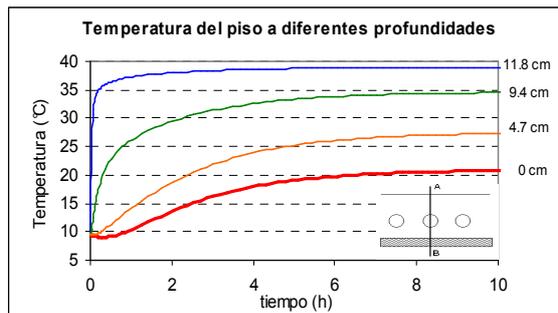


Figura 4: Temperatura del piso a diferentes profundidades, en un eje que pasa por el centro del conducto.

En las Figuras 4 a 6 se pueden analizar algunos resultados obtenidos con el modelo térmico ya incorporado a SIMUSOL. La Figura 4 muestra la evolución temporal de la temperatura a diferentes profundidades en el piso, pasando por el eje central del conducto (línea A-B en la Figura 4). Se observa que la superficie del piso alcanza su máximo valor ( $20^\circ\text{C}$ ) en aproximadamente 6 horas, tiempo que depende fuertemente del espesor del contrapiso. En este caso particular, la superficie del piso siempre estará más caliente que la temperatura del local (fijada en  $4^\circ\text{C}$ ). La situación puede invertirse (en verano sin circulación de aire por los conductos, o inclusive en invierno durante las horas nocturnas, por ejemplo), con lo que el piso al estar a menor temperatura que el local absorbería el calor del aire, enfriándolo. En la Figura 4, el pequeño descenso de la temperatura superficial durante la primera hora de calentamiento se debe a las condiciones iniciales: en los primeros instantes, en que aún no se evidencia el calentamiento procedente de los conductos, la superficie del piso se encuentra más caliente que el aire del local, por lo que comienza a enfriarse hasta que el aporte de calor desde abajo comienza a ser más importante que las pérdidas convectivas y radiativas, momento en el cual la superficie comienza a calentarse.

En la Figura 5 se puede observar el perfil de temperatura del piso según un corte transversal, a las 2, 5 y 10 horas de comenzado el calentamiento mediante el flujo de aire. Se observa cómo avanza el perfil de temperatura hacia arriba a medida que transcurren las horas. Este perfil alcanza el estado estacionario cuando las ganancias debido al aporte de los conductos igualan a las pérdidas por convección y radiación. En esta figura también se aprecia el efecto de la aislación inferior que impide parte de las pérdidas hacia el suelo, situación evidenciada por la asimetría vertical del perfil de temperatura: si consideramos las mismas distancias desde el centro del conducto, hacia abajo la temperatura del contrapiso es mayor que hacia arriba.

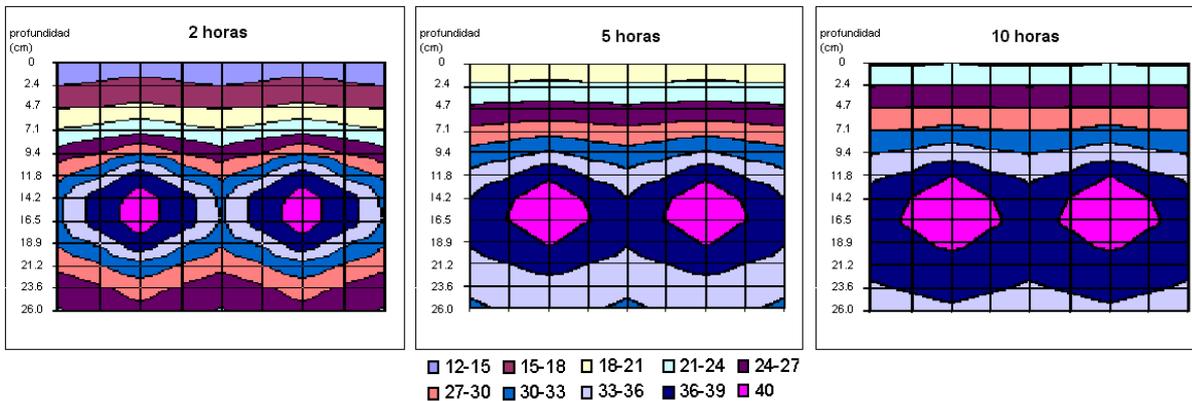


Figura 5: Evolución temporal del perfil de temperaturas del piso radiante (corte transversal).

En la Figura 6 se analiza el aporte energético del piso. Este aporte involucra la transferencia de calor por convección (entre la superficie del piso y el aire del local) y la transferencia de calor por radiación (entre la superficie del piso y las restantes superficies del local). El aporte de calor del piso, cuando alcanza su estado estacionario, ronda los  $130 \text{ W/m}^2$ , de los cuales un 60% proviene de la radiación y un 40% de la transferencia por convección. Los porcentajes obtenidos coinciden con los resultados encontrados por otros autores (Bozkir y Canbazoglu, 2004).

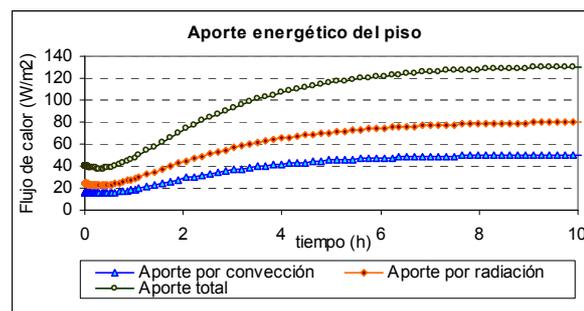


Figura 6: Aporte energético del piso ( $\text{W/m}^2$ ).

En un caso real, tanto la temperatura del aire que circula por los conductos como la temperatura del local no serán siempre constantes, sino que dependerán del tipo de sistema de calentamiento utilizado en el primer caso, y de las condiciones climáticas exteriores, geometría y materiales utilizados en la construcción del local, en el segundo caso. A su vez, la temperatura del piso dependerá, entre otras variables, de la velocidad y temperatura del aire que circula por los conductos. Esta situación más compleja se ejemplifica en el apartado siguiente mediante la descripción del monitoreo de un piso radiante en condiciones reales de funcionamiento. La simulación mediante SIMUSOL de este caso es mucho más compleja, debido a las condiciones variables de funcionamiento ya descriptas, y se prevee realizarla en un trabajo futuro.

## MONITOREO DE UN PROTOTIPO CON PISO RADIANTE

Se dispone de un prototipo liviano, recientemente construido en las instalaciones del INENCO en la Universidad Nacional de Salta, que cuenta con el sistema de conductos incorporado en el contrapiso. Consta de un módulo de  $3\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  de planta y  $2.3\text{ m}$  de altura, con paredes de ladrillo cerámico hueco y techo de chapa con aislación ( $5\text{ cm}$  de poliestireno expandido de alta densidad). En el contrapiso se colocaron 18 conductos de chapa galvanizada de  $7.5\text{ cm}$  de diámetro, separados  $10\text{ cm}$  entre sí, para la circulación de aire por debajo del contrapiso (ver Figura 7). Un canal colector rectangular de  $18\text{ cm} \times 24\text{ cm}$  a la entrada y otro de similares dimensiones a la salida distribuyen el aire caliente entre los conductos. El piso está aislado térmicamente por debajo y por los laterales ( $4\text{ cm}$  de poliestireno expandido de alta densidad) para evitar las pérdidas de calor por el suelo y hacia el ambiente exterior. Se embutieron termocuplas tipo T en distintas ubicaciones en el contrapiso y en los conductos, y se dejaron previstos orificios en cada uno de los conductos para introducir más sensores de temperatura y sondas TSI de velocidad de aire. En este prototipo, el aire que circula por los conductos es calentado por dos colectores solares ( $5\text{ m}^2$ ) conectados en paralelo, para lo cual se utiliza circulación forzada en circuito cerrado mediante un ventilador axial (con motor monofásico de  $500\text{ rpm}$ ). El sistema completo está esquematizado en la Figura 7. En cada una de las bocas de salida de los colectores y del ventilador se colocaron registros que permiten regular el caudal de aire que circula por el sistema.

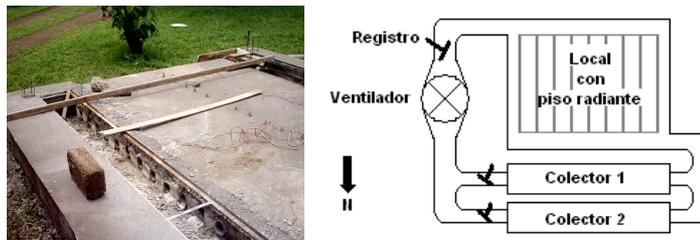


Figura 7: a) Detalle del piso radiante utilizado en el prototipo del INENCO. Se observan las termocuplas embutidas en el hormigón y el canal de distribución de aire. b) Esquema del sistema completo de calentamiento con colectores solares.

Un estudio completo de este sistema de calefacción debe incluir un monitoreo de su funcionamiento durante todo el periodo invernal. Debido a que este prototipo se terminó de construir recientemente, aún no se dispone de medidas continuas durante todo el invierno. Los datos presentados corresponden a las primeras medidas realizadas, comprendidas entre el 5 y el 9 de agosto de 2006. El monitoreo se realizó cada 15 minutos e incluyó la temperatura del aire dentro del prototipo y dentro de los conductos, la temperatura superficial del piso acumulador, la temperatura del contrapiso a 15.8 cm de profundidad y las condiciones climáticas exteriores. El periodo de monitoreo se subdividió en dos: uno en que el sistema estuvo apagado y el piso sin flujo de aire caliente (5 y 6 de agosto) y otro con el piso radiante en funcionamiento (7 y 8 de agosto). Las mediciones de temperatura se realizaron mediante termocuplas tipo T conectadas a un módulo ADAM 4018M, un HOBO H8 para monitorear la temperatura exterior y un termómetro infrarrojo de mira directa IRCON ULTIMAX para temperatura superficial. La velocidad de aire se midió con una sonda TSI VelociCalc Model 8345 y los datos de radiación fueron suministrados por el Laboratorio de Radiación del INENCO, que cuenta con un piranómetro permanentemente conectado a un equipo CAMPBELL.

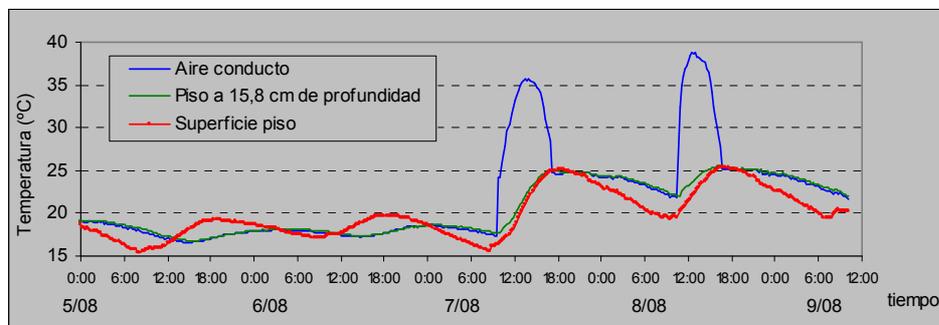


Figura 8: Temperatura del aire en el conducto, del piso a 15.8 cm de profundidad y de la superficie del piso, para el periodo comprendido entre el 5 y el 8 de agosto de 2006 (hora local).

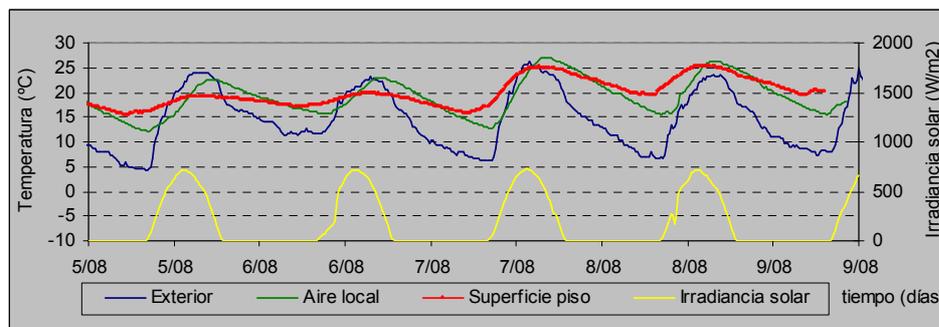


Figura 9: Temperatura del aire del local y de la superficie del piso, temperatura exterior e irradiancia solar sobre superficie horizontal, para el periodo comprendido entre el 5 y el 8 de agosto de 2006 (hora local).

Los resultados del monitoreo se analizan en las Figuras 8 y 9, en las que se han seleccionado sólo las series de datos más representativas: temperatura del aire en el conducto central, temperatura superficial del suelo y a 15.8cm de profundidad en el centro del piso del prototipo (a fin de descartar efectos de borde), temperatura del aire del local y condiciones meteorológicas exteriores. Los cuatro días tuvieron condiciones meteorológicas similares: fueron días claros sin nubosidad, con irradiancias medias diarias entre 16 y 17MJ/día y temperaturas exteriores promedio de 14.8°C. Para el primer caso, la temperatura promedio del local (18.2°C), la superficie del piso (18°C) y a una profundidad de 15.8cm (17.9°C) fueron similares. La Figura 8 muestra que para estos días la temperatura horaria del piso fue idéntica a la del aire quieto en el conducto. En estos días el calentamiento del local (3.4°C por encima de la ambiente promedio) se debió exclusivamente al aporte de la ganancia solar directa a través de la superficie vidriada (Figura 9).

En los dos días siguientes el sistema se puso en funcionamiento entre las 11:00AM y las 17:00PM, hora en la que comienza el sombreado de los colectores por los elementos circundantes. El 7 de agosto se testeó el sistema funcionando con una velocidad de aire de 1.6m/s en el conducto central del piso, mientras que el 8 de agosto se disminuyó a la mitad el flujo de aire, hasta una velocidad de 0.8m/s, a fin de monitorear el efecto de la velocidad sobre la temperatura del aire del colector.

Los resultados de la Figura 8 evidenciaron un aumento de 5°C en la temperatura media del piso a 15.8 cm, que alcanzó los 23°C con máximos de 25°C. En consecuencia, el aumento de la temperatura promedio en su superficie fue de 3.5°C, alcanzando temperaturas máximas de 25.2°C, valores por debajo del límite máximo recomendado para asegurar el confort térmico. La masa térmica del piso provoca un defasaje de 3.5 horas entre la ocurrencia del máximo de temperatura del aire en el conducto (a las 13:30PM, coincidente con el máximo de radiación solar) y el máximo en la superficie del mismo (a las 17:00PM). También es interesante destacar que a la hora en que se apaga el sistema, el piso ya ha acumulado toda la energía posible, alcanzando una temperatura uniforme en toda su masa (en la Figura 8 la temperatura superficial es la misma que la del nodo a 15.8 cm de profundidad). El local presenta una temperatura promedio de 20.5°C, un grado por debajo de la superficie del piso, aunque no se descarta que exista un aporte directo de calor debido a filtraciones de aire de los conductos hacia el local, las cuales deberán ser detectadas y corregidas. Finalmente, la comparación entre los dos últimos días indica que al disminuir de 1.6 a 0.8m/s la velocidad del aire en el interior del canal y, en consecuencia, en los colectores solares, la temperatura del aire circulante aumentó, pasando de 35.5°C de temperatura máxima al mediodía solar del 7 de agosto a 38.3°C el 8 de agosto.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el estudio térmico bidimensional de un piso radiante, para lo cual se utilizó la similitud térmico-eléctrica para modelizar las transferencias de calor en el piso mediante el programa SIMUSOL. Se encontró que el aporte de calor del piso en estado estacionario y para temperaturas del aire constantes, rondó los 130 W/m<sup>2</sup>, de los cuales un 60% proviene de la radiación y un 40% de la transferencia por convección. Las medidas realizadas en un prototipo construido recientemente en dependencias del INENCO, que utiliza colectores solares de aire para calentamiento y circulación forzada mediante un circuito cerrado, indican la viabilidad de estos sistemas como método de calefacción.

Una alternativa interesante es reinyectar parte del aire de los conductos al ambiente, para calentarlo rápidamente (en este caso, alrededor de un 50% se entrega al ambiente por convección y un 50% por radiación), lo cual sería una ventaja adicional frente a los sistemas hidrónicos, en los que se necesitan algunas horas para que la masa de acumulación comience a entregar el calor acumulado. Por otra parte, con diseños apropiados existe la opción en verano de utilizar los conductos para refrescar el ambiente, aprovechando el potencial de enfriamiento del suelo. En general, los colectores solares que calientan aire manejan flujos o caudales mucho más grandes que los que calientan agua, lo cual se manifiesta en mayores secciones de las canalizaciones y del área de captación. Una alternativa interesante sería utilizar el mismo techo como colector de aire, con lo que el aire estratificado en la parte superior se reintroduce en los conductos mediante un extractor.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CIUNSA N°1332. Los autores desean expresar su agradecimiento al Sr. Ricardo Echazú por las medidas de irradiancia solar suministradas y por el apoyo brindado en la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Athienitis A. (1997). Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating. *Solar Energy* 61, pp. 337-345.
- Barton P., Beggs C. B., Sleigh P. A. (2002). A theoretical study of the thermal performance of the TermoDeck hollow core slab system. *Applied Thermal Engineering* 22, pp. 1485-1499.
- Bilgen E., Richard M. A. (2002). Horizontal concrete slabs as passive solar collectors. *Solar Energy* 72, 5, pp. 405-413.
- Bozkir O., Canbazoglu S. (2004). Unsteady thermal performance analysis of a room with serial and parallel duct radiant floor heating system using hot airflow. *Energy and Buildings* 36, pp. 579-586.
- Choa S. H., Zaheer-uddin M. (1999). An experimental study of multiple parameter switching control for radiant floor heating systems. *Energy* 24, pp. 433-444.
- Givoni B. (1976). *Man, Climate and Architecture*, 2° Edición, Applied Science Pub., Londres.
- Hisashi F., Sadao T. (1999). Thermal storage with concrete slab of pressurized plenum in underfloor air distribution system. 6° International IBPSA Conference on Building Simulation.
- Grión M., Castro L., Lesino G., Saravia L. (1983). Prototipo de vivienda para ensayo de techos colectores sin cubierta y acumulación en el piso., 8° Reunión de Trabajo de ASADES, pp. 25-32.
- Incropera F.P., DeWitt D.P. (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Ed. Wiley.
- Koschenz M., Dorer V. (1999). Interaction of an air system with concrete core conditioning. *Energy and Buildings* 30, p.39.
- Kuznetsov A. V. (1997). Optimal control of the heat storage in a porous slab. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 40, 7, p. 1720.
- Lesino G., Castro L., Saravia L., Grión M., Caso R., de Rosa C., Basso M., Fernández J., Gilbert A., Lelio G., Solanes F., Vilapriño R., Armando V., Puig A., Ravetto A., Fucaraccio J., Rebora R., Lofano L. (1984). Sistema Activo Colector-Piso Acumulador. 9° Reunión de Trabajo de la ASADES, pp. 136-142.
- Magyar E., Keller B. (1998). The storage capacity of a harmonically heated slab revisited. *Int. J. Heat Mass Transfer* 41, 10, pp. 1199-1204.
- Ren M.J., Wright J. A. (1998). A Ventilated Slab Thermal Storage System Model. *Building and Environment* 33, I, pp. 43.

## BI-DIMENSIONAL THERMAL SIMULATION OF A RADIANT FLOOR

**ABSTRACT:** In this paper the bi-dimensional thermal analysis of a radiant floor is presented. The correspondance between thermal and electrical circuits and SIMUSOL program are used to model the floor heat transfer and to predict the temperature profile inside the floor, on its surface, and its energy contribution to heating through convection and radiation. Then, the

measures from August 5<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup> 2006 on a prototype that uses solar collectors for air heating, recently builded at INENCO, are described. The obtained results of this heating system are promising and the bi-dimensional model of the system seems to be useful to describe it.

**Keywords:** heat storage, radiant floor, heating systems, energy efficiency, SIMUSOL.