

COLECTORES SOLARES DE AIRE PARA CALEFACCIÓN MEDIANTE PISO ACUMULADOR

S. Flores Larsen¹, L. Saravia¹, L. Dorado, G. Lesino

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 de un piso acumulador con conductos de aire, construido en dependencias del INENCO. El prototipo utiliza colectores solares para el calentamiento del aire. Se describen las medidas realizadas durante el periodo invernal 2007. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran la viabilidad del piso radiante como método de calefacción. Queda por estudiar la manera de minimizar la diferencia de temperatura en la superficie del suelo entre la zona cercana a la entrada de aire caliente y a la salida del aire, que actualmente es de alrededor de 5°C.

Palabras clave: piso acumulador, losa radiante, sistemas de calefacción, ahorro energético.

INTRODUCCIÓN

La utilización de piso radiante para acondicionamiento de ambientes está teniendo cada vez más repercusión debido principalmente a tres razones: a) es más confortable que los sistemas de calefacción convencional por convección de aire, puesto que se genera un calor uniforme que se disipa lentamente hacia arriba, b) permite ahorros energéticos del 15 al 30% respecto de un sistema tradicional debido a que la temperatura del aire ambiente interior puede disminuirse en alrededor de 2°C sin afectar el confort térmico (Givoni, 1976), y c) la calidad del aire no se ve afectada por problemas de polvo o humedad. En el ámbito de la construcción de edificios energéticamente eficientes el sistema ha tenido buena aceptación debido a que se pueden alcanzar importantes ahorros de energía convencional, los cuales pueden incrementarse aún más con la incorporación de sistemas automáticos de control (Bozkir y Canbazoglu, 2004; Hisashi y Sadao, 1999; Athienitis, 1997). En la Argentina se utiliza losa radiante de tipo hidrónica con calderas para calentamiento de agua, sin tener demasiado 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.

Estudios experimentales realizados por Bilgen y Richard (2002) para un piso acumulador calentado en su superficie mediante lámparas halógenas muestran que aproximadamente un 60% de la energía acumulada en el piso es transferida por convección, mientras que un 40% es transferida por radiación. Resultados similares fueron encontrados mediante la simulación de pisos radiantes, en la que se consideraron las transferencias convectivas y radiativas (Flores Larsen et al., 2006), para las cuales se utilizó el programa SIMUSOL que permite tratar las alinealidades provenientes de la transferencia por radiación.

En zonas con buenos niveles de radiación y días de cielo claro en invierno, se pueden utilizar colectores solares para calentar el fluido, con lo que se podrían alcanzar altos porcentajes de ahorro energético. 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 con un desfase que usualmente va entre 3 y 4 horas. Este periodo puede ser controlado mediante el espesor de la capa de hormigón y las características radiativas superficiales del piso (Magyari y Keller, 1998). 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. Además los colectores pueden adosarse a los muros o techos de la construcción, con lo que en principio no sería necesario contar con espacios exteriores extensos para ubicar los colectores. Un sistema de calefacción de respaldo funcionaría durante los días nublados.

El INENCO cuenta con un prototipo de piso radiante con aire en el que el calentamiento del aire se realiza mediante colectores solares. Medidas previas realizadas durante el año 2006 permitieron determinar algunos problemas, como falta de estanqueidad de los canales, rotura o desgaste de la aislación en los colectores solares y distribución despareja del flujo de aire en los conductos del contrapiso, que fueron corregidos antes de iniciar el nuevo monitoreo. En el presente trabajo se describe el prototipo utilizado, las medidas realizadas en el sistema durante el periodo invernal 2007 y los resultados y consideraciones prácticas surgidos del análisis de los datos.

¹ Investigador de CONICET.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO MONITOREADO

El piso radiante monitoreado tiene un área de 3m x 2.5m y un espesor de 30cm de espesor. El aire circula a través de 18 conductos de chapa galvanizada de 7.5cm de diámetro, separados 10 cm entre sí (Figura 1). En este caso la conexión de los conductos es del tipo paralelo, menos común que la conexión en serie utilizada por los sistemas hidrónicos, pero de mayor eficiencia cuando el fluido caloportador es aire (Bozkir y Canbazoglu, 2004). Dos canales colectores rectangulares con tapas de hormigón, de 18cm x 24cm cada uno, distribuyen el aire entre los conductos. El piso está aislado térmicamente por debajo (4cm de poliestireno expandido de alta densidad) para evitar las pérdidas de calor hacia el suelo. Durante la construcción del contrapiso se embutieron termocuplas tipo T en el hormigón y en los canales. Además se dejaron previstos orificios en el centro de cada uno de los conductos para introducir más sensores de temperatura y de velocidad de aire.

El prototipo se completó con paredes de ladrillo cerámico hueco y techo de chapa con aislación térmica (5cm de poliestireno expandido de alta densidad). El aire que circula por los conductos es calentado por dos colectores solares (5m²) conectados en paralelo, para lo cual se utiliza circulación forzada en circuito cerrado mediante un ventilador axial (con un motor monofásico de 500 rpm). 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.

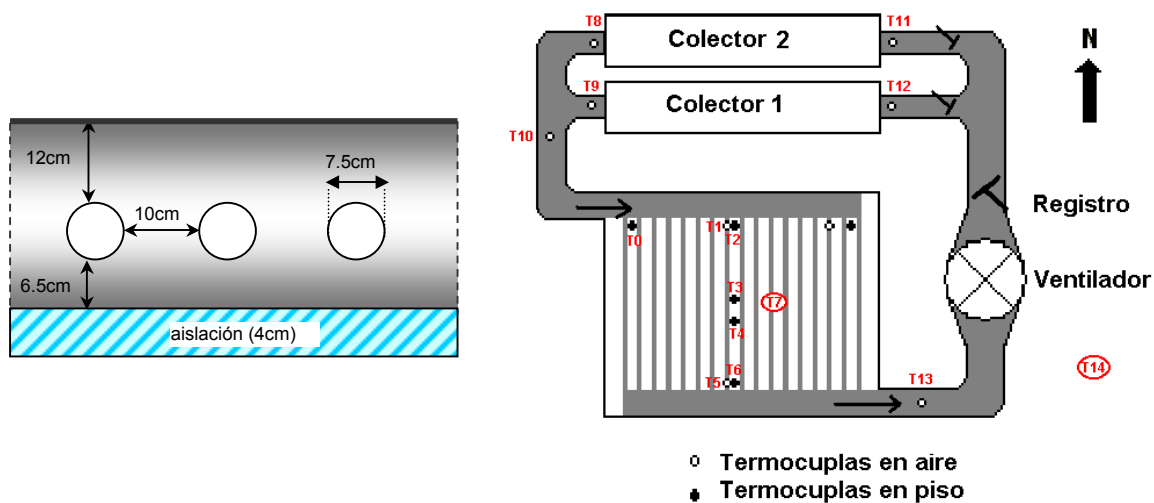


Figura 1: Esquema del piso radiante monitoreado (izquierda) y del sistema completo de calentamiento con los colectores solares de aire (derecha). En el esquema se muestra la ubicación de las termocuplas de medida (T0 a T14) y el sentido del flujo de aire.

En un trabajo previo (Flores Larsen et al., 2006) se presentaron los primeros resultados del monitoreo de este local. Uno de los principales problemas detectados fue la despareja distribución del aire en los conductos por debajo del contrapiso, que causaban una diferencia de temperatura en la superficie del piso entre la zona este y la oeste. Este problema se corrigió adicionando registros individuales en cada uno de los conductos y regulando dichos registros hasta que se obtuvo una distribución uniforme del flujo de aire. Con esta corrección se logró homogeneizar la asimetría en el sentido este-oeste. Además, se adicionaron burletes en las tapas de los canales colectores, a fin de evitar las filtraciones de aire caliente hacia el local y se reacondicionaron las aislaciones en los conductos y partes metálicas de los colectores solares.

MONITOREO DURANTE EL PERIODO INVERNAL 2007

Durante los meses de julio y agosto de 2007 se realizó el monitoreo cada 15 minutos del sistema, registrándose mediante un hobo H8 y adquirentes de datos ADAM 4018 y 4018M conectados a una Laptop las siguientes variables (ver Figura 1):

- En el local: temperatura del piso a 15.8cm de profundidad, en distintas ubicaciones (T0, T1, T4, T6), temperatura superficial del piso en el centro del local (T3), temperatura del aire a la entrada (T2) y a la salida (T5) del conducto central, temperatura del aire en el centro del local (T7).
- En los colectores: temperatura del aire a la entrada de los colectores 1 (T12) y 2 (T11), temperatura del aire a la salida de los colectores 1 (T9) y 2 (T8), temperatura del aire en el conducto maestro a la entrada (T10) y salida del local (T13), temperatura ambiente exterior (T14).

Además se midió manualmente la velocidad del aire en los 18 conductos y en las bocas de entrada y salida de los colectores, mediante una sonda TSI VelociCalc Model 8345. Para registrar la distribución de temperatura en la superficie del piso se utilizó un termómetro infrarrojo de mira directa IRCON ULTIMAX. Los datos de irradiancia media sobre superficie horizontal se registraron cada 5 minutos con un piranómetro calibrado conectado a un equipo Campbell en permanente funcionamiento en el Laboratorio de Radiación del INENCO.

Para el presente trabajo se seleccionó la semana comprendida entre el 11 y el 17 de agosto de 2007, en la cual durante los dos primeros días el sistema estuvo apagado y durante el resto de la semana estuvo en funcionamiento entre las 11:00 y 16:00hs

(hora local). La velocidad de aire en el interior de los tubos fue del orden de 0.8m/s, verificándose que esta velocidad fuera similar para los 18 tubos.

En la Figura 2 se grafican la temperatura del local, temperatura de la superficie del piso en el centro del local y las condiciones meteorológicas (temperatura ambiente exterior e irradiación solar sobre superficie horizontal) para la semana del 11 al 18 de agosto de 2007. La semana se caracterizó por días de cielo claro con valores máximos de irradiación solar sobre superficie horizontal de alrededor de 750 W/m² en el mediodía solar. En cuanto a la temperatura ambiente exterior, ésta registró mínimas de 0°C y máximas de 35°C, valor que estuvo por encima del record histórico para el mes de agosto. Durante los dos primeros días, en que el sistema estuvo apagado para monitorear el comportamiento térmico del local sin el aporte de calor del piso, se observa que para una media exterior de 8°C, la temperatura media del local fue de 12.5°C y la temperatura media superficial del piso fue de 14.2°C. Al encenderse el sistema el día 13 de agosto, se observa el incremento de 6°C en la temperatura media del local y de 8°C en la temperatura media de la superficie del piso. Mientras el sistema se mantiene encendido durante los días 13 a 17, la superficie del piso nunca desciende de 20°C y el local nunca desciende de 15°C en horas en que la temperatura exterior alcanza los 0°C. Otro efecto importante es el desfase obtenido: la superficie del piso alcanza su máxima temperatura alrededor de las 20h, aproximadamente 4 horas más tarde que la temperatura exterior y casi 7 horas más tarde que el máximo de radiación solar. Puede realizarse un análisis cualitativo de la la temperatura del local con el sistema encendido y con el sistema apagado comparando dos periodos similares, el primero entre las 8:00 del 12 de agosto y las 8:00 del 13 de agosto, y el segundo entre las 8:00 del 16 de agosto y las 8:00 del 17 de agosto: ambos días tuvieron condiciones de temperatura exterior similares, registrándose un aumento de 7.5°C en la temperatura media del local cuando funciona el sistema (Tabla 1). La Figura 2 muestra que cuando el sistema está apagado se requiere de calefacción auxiliar durante todo el día para alcanzar una temperatura mínima de 18°C, mientras que cuando el sistema funciona, sólo se requiere de calefacción auxiliar durante la madrugada y primeras horas de la mañana.

Tabla 1: comparación de las temperaturas del local y del piso cuando el sistema está encendido y apagado.

Periodo	Exterior			Local				Sistema
	Máxima exterior	Media exterior	Mínima exterior	Máxima local	Media local	Mínima local	Media piso	
12/08 8:00AM a 13/08 8:00AM	21.5°C	10.0°C	0°C	17.8°C	12.5°C	7.5°C	14.2°C	Apagado
16/08 8:00AM a 17/08 8:00AM	21.6°C	11.0°C	0°C	25.9°C	20.1°C	14.7°C	25.8°C	Encendido

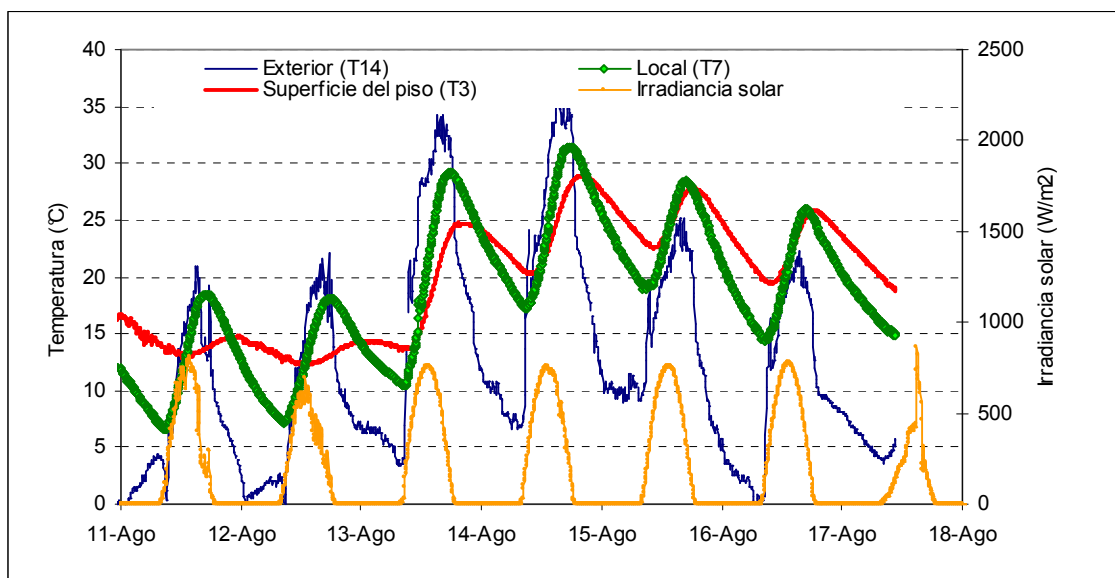


Figura 2: temperatura del local, temperatura de la superficie del piso en el punto central y condiciones meteorológicas (temperatura ambiente exterior e irradiación solar sobre superficie horizontal) para la semana del 11 al 17 de agosto de 2007.

En la Figura 3 se puede cuantificar el aumento de temperatura del aire en su paso por los colectores solares. Los picos que se observan corresponden a los instantes de encendido y apagado del ventilador. Alrededor del mediodía solar, la temperatura del aire en su paso por el colector aumenta entre 28°C y 30°C. La irradiación solar sobre superficie horizontal fue similar durante los cuatro días, mientras que la temperatura exterior fue más alta durante los dos primeros días (ver Figura 2). En los

dos primeros días la temperatura de salida del aire fue mayor debido a que las pérdidas hacia el ambiente exterior son menores por las altas temperaturas exteriores.

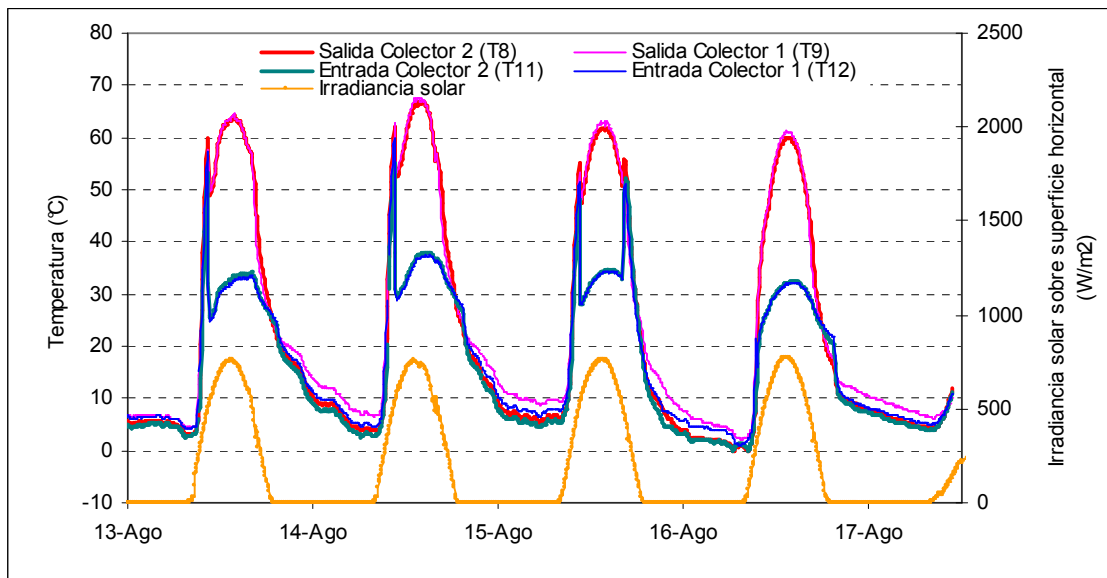


Figura 3: temperatura del aire a la entrada y a la salida de los colectores solares de aire para el periodo de funcionamiento del sistema (13 al 16 de agosto de 2007). El horario de funcionamiento fue entre las 11 y las 16h, excepto el último día que se encendió a las 9:30 y se apagó a las 17h.

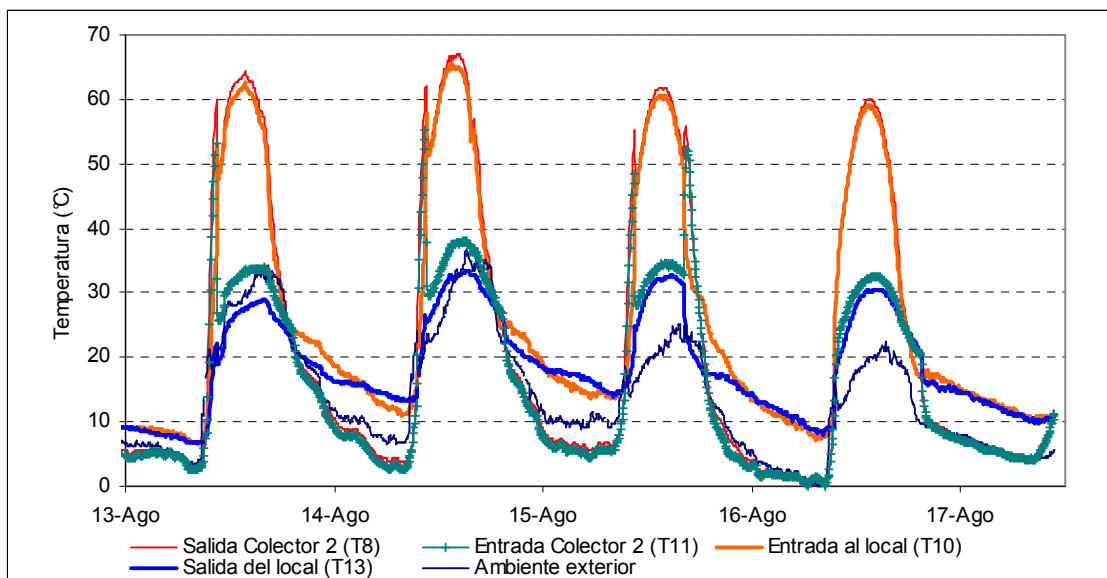


Figura 4: temperatura del aire a la entrada y a la salida de los colectores solares de aire y a la entrada y salida del local, para el periodo de funcionamiento del sistema (13 al 16 de agosto de 2007). El horario de funcionamiento fue entre las 11 y las 16h, excepto el último día que se encendió a las 9:30 y se apagó a las 17h.

En la Figura 4 se analiza el efecto de las pérdidas de calor en los conductos exteriores: se observa que, a pesar de la aislación térmica colocada en todos los conductos exteriores, alrededor del mediodía solar la temperatura del aire cae aproximadamente 3°C en los 2.5m existentes entre la salida del colector y la entrada al local. La mejora de la aislación térmica es un compromiso económico, puesto que una variación de tres grados en la temperatura del aire que circula por los conductos no influye sustancialmente en la cantidad de calor entregado por el piso radiante al aire del local. El aumento de temperatura que se observa entre la salida del local y la entrada a los colectores se debe a la radiación solar que calienta los conductos.

El análisis de la Figura 5 tiene varios aspectos importantes a destacar:

- **“Pérdidas” en el canal de distribución interior:** las mediciones muestran bajas temperaturas de ingreso del aire en el conducto central del piso radiante (T2), la cual no superó los 37°C (Figura 5). Como el aire ingresa al local con una temperatura de 60°C, se consideró como posible causa de la pérdida de calor a que la tapa de hormigón del canal de entrada

(de aproximadamente 2cm de espesor) no está aislada. Esta situación se corrobora luego de realizar mediciones con termografía infrarroja (Figura 6, derecha), que muestra temperaturas superficiales de 29°C para la tapa del canal (medidas realizadas a las 16h del 13 de agosto de 2007), mientras que en el resto de la superficie la temperatura oscila entre 19.5 y 24.5 C. En realidad, en un principio no se consideró aislar la tapa del canal, puesto que ésta forma parte del mismo piso y todo el calor que acumula es restituído al ambiente del local. Sin embargo, las altas temperaturas que alcanza la tapa exceden el límite permitido de 28°C, por lo que de todas maneras debe ser aislada. En esta nueva situación, debido a la mayor temperatura que alcanzaría el aire circulante, se espera que la superficie del piso se caliente aún más, lo cual es ahora un problema puesto que ya está sobre el límite máximo permitido de 28°C. La mejora en la aislación se verá reflejada en la posibilidad de disminuir el área de los colectores, factor económico determinante en el costo del sistema.

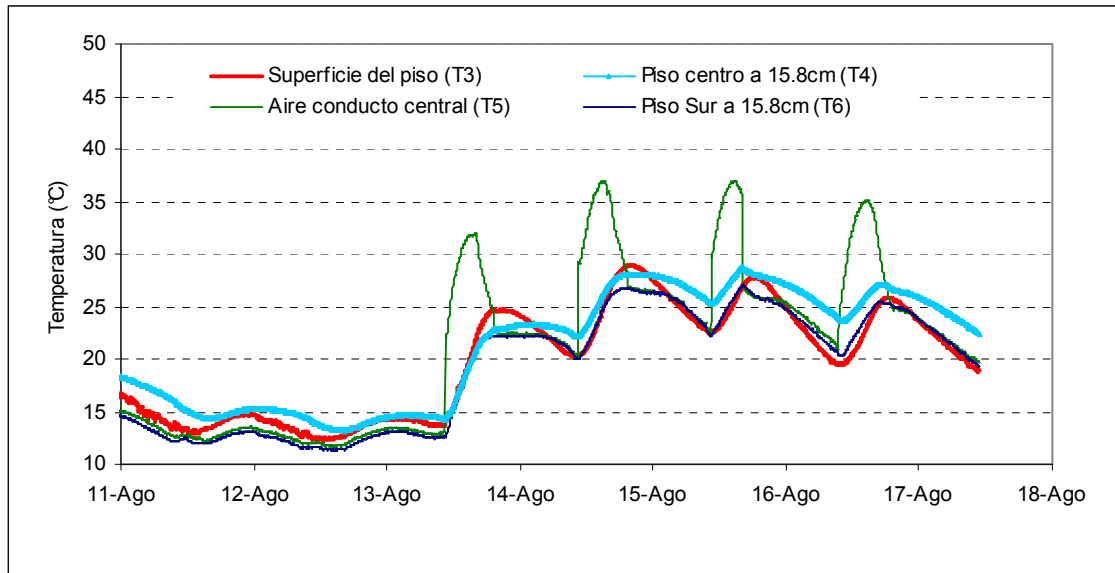


Figura 5: temperatura del piso a 15.8cm de profundidad, en el centro y sur del local, temperatura superficial del piso en el centro del local y temperatura del aire en el conducto central (11 al 16 de agosto de 2007).

- Asimetría en la distribución espacial de la temperatura del piso: se registró una diferencia de 3°C entre las temperaturas centro y sur del piso a 15.8cm de profundidad (Figura 5) y diferencias de hasta 10°C entre la temperatura superficial (Figura 6) entre la esquina noroeste y la sureste. En estos 10°C está incluido el efecto de la falta de aislación de la tapa del canal de entrada, por lo que la diferencia real sería de 5°C. Como regla de dedos, equivaldría a una disminución de aproximadamente 1°C por metro de longitud. Esta asimetría debe ser estudiada para encontrar la manera de minimizarla, probablemente invirtiendo cada un cierto periodo de tiempo los sentidos de flujo del aire caliente.

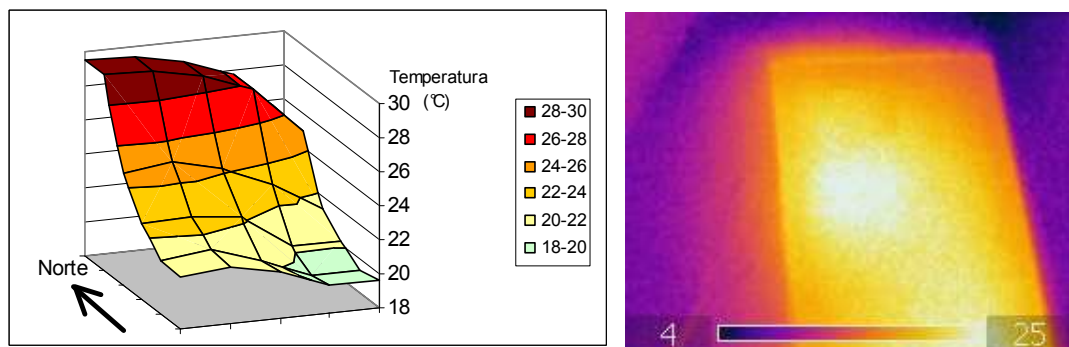


Figura 6: Izquierda: distribución de la temperatura superficial del piso. Las altas temperaturas en el lado norte corresponden a la tapa del canal sin aislar. Derecha: imagen cualitativa del extremo noroeste (por donde ingresa el aire caliente) de la tapa del canal tomada con una cámara termográfica una hora después del encendido del sistema (28 de agosto, 11AM).

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos en el monitoreo de un piso acumulador calentado por un sistema de conductos de aire y colectores solares. Los datos experimentales evidencian la viabilidad de este tipo de sistema de calefacción como una manera de reducir el consumo de energía convencional. Una de las ventajas es la posibilidad de desfasar en algunas horas la ocurrencia del máximo de temperatura del piso con el máximo de radiación solar, que permite

calefaccionar el ambiente cuando los niveles de radiación exterior son bajos y ya no se puede contar con ganancia solar directa (a través de superficies vidriadas) o indirecta a través de colectores solares de aire.

En el transcurso del monitoreo se fueron encontrando y solucionando, cuando fue posible, una variedad de problemas, de los que los más significativos fueron la mejora de la distribución del flujo de aire en los conductos, la detección de problemas de estanqueidad, la aislación de la tapa del canal de ingreso del aire caliente, entre otros. Esto permitió mejorar la homogeneidad de la distribución espacial de la temperatura superficial, aunque la solución definitiva del problema aún no se ha alcanzado. Una alternativa posible es la inversión del sentido del flujo de aire, alternándolo cada ciertos periodos de tiempo a determinarse. Del análisis realizado se evidencia que el diseño de un piso acumulador no es sencillo, puesto que hay que tener en cuenta factores tales como el espesor del contrapiso (espesores pequeños implican menor acumulación, menor desfase y mayores temperaturas superficiales que pueden exceder los límites permitidos, mientras que espesores grandes tienen mayor capacidad de acumulación pero podrían disminuir la entrega de calor al local debido a las menores temperaturas superficiales), distancia óptima entre conductos, diámetro de los mismos, flujo óptimo, etc. Además deben tenerse en cuenta algunas consideraciones prácticas para obtener una distribución de temperatura lo más pareja posible, como por ejemplo un exhaustivo cuidado del aislamiento térmico y de la distribución del flujo de aire. Sería de fundamental importancia contar con un modelo analítico que permita estudiar el comportamiento térmico transitorio del piso bajo distintas configuraciones, espesores, temperatura del fluido, etc. Actualmente se cuenta con simulaciones numéricas, pero se está trabajando en la obtención de un modelo analítico que posibilite su incorporación a un programa de diseño de este tipo de sistemas, con posibilidad de utilización por parte de ingenieros y arquitectos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por CIUNSa N°1332 y por PAE 22559 – BID 1718/OC-AR “Eficiencia Energética en el Hábitat construido”. Los autores desean expresar su agradecimiento al Sr. Ricardo Echazú por las medidas de irradiancia solar suministradas y a los Sres. Ricardo Caso, Carlos Fernández y Hugo Suligoy por el apoyo brindado en la realización del presente trabajo. La imagen termográfica fue tomada con una cámara InfraCAM de FLIR y facilitada por personal de la empresa CEMYA en una visita a las instalaciones del INENCO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Athienitis A. (1997). Investigation of thermal performance of a passive solar building with floor radiant heating. *Solar Energy* 61, pp. 337-345.
- 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.
- Flores Larsen S., Saravia L., Lesino G., Condori M., Caso R., Suligoy H., Fernandez C. (2006) “Simulación térmica bidimensional de un piso radiante”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10*, pp. 03.97-03.103, ISSN 0329-5184.
- 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.
- Magyar E., Keller B. (1998). The storage capacity of a harmonically heated slab revisited. *Int. J. Heat Mass Transfer* 41, 10, pp. 1199-1204.

STORAGE FLOOR WITH SOLAR AIR COLLECTORS FOR SPACE HEATING

ABSTRACT: In this paper the thermal analysis of a radiant floor with embedded air tubes, built at INENCO campus, is presented. The prototype uses solar collectors for air heating and it was monitored during winter 2007. The obtained results of this heating system are promising. The surface temperature difference, around 5°C, between the zones of air input and output needs to be minimized.

Keywords: heat storage, radiant floor, heating systems, energy saving.