

EFECTO DE LA AISLACION INFERIOR Y LATERAL EN UN PISO RADIANTE SOLAR. ESTUDIO NUMERICO.

Luis Cardón y Diego L. Alberto
Grupo de Mecánica Computacional, Facultad de Ciencias Exactas, UNSA
Av. Boliva 5150, 4400 Salta, Argentina (cardon@unsa.edu.ar)
www.unsa.edu.ar/gmc

RESUMEN: Se estudió numéricamente el efecto de la aislación inferior y lateral en el comportamiento térmico de pisos radiantes hidrónicos calefaccionados por energía solar.

Se utilizó el modelo numérico descrito en Alberto y Cardón (2007) basado en MULTIMOD. Este describe el comportamiento térmico del piso por debajo de una casa o habitación y el suelo expuesto a las condiciones ambientales alrededor de la casa. El piso radiante está constituido por una parrilla de ocho tubos calefactores embebida en una de las varias capas que componen el piso y el suelo en profundidad. La planta del piso a calefaccionar tiene un área de $2\text{ m} \times 3\text{ m}$. La planta total simulada es de $4\text{ m} \times 5\text{ m}$ y de $1,8\text{ m}$ de profundidad.

Se realizaron varias simulaciones colocando la parrilla de tubos a 13 cm y a 33 cm con la aislación a 26 , 36 y 46 cm en un primer caso y a 46 cm en el segundo. En este trabajo se describe el efecto de una capa de 5 cm de tergopol usada como aislación inferior y el efecto de una aislación perimetral de igual espesor.

Palabras claves: pisos radiantes hidrónicos, energía solar

INTRODUCCION

La modelización de pisos y pisos radiantes ha sido objeto de creciente interés en los últimos años. En cuanto a los pisos radiantes, el trabajo de Sattaria y Farhanieh (2006) es uno de los más recientes. Estos autores presentan un análisis térmico bidimensional detallado en la proximidad de los tubos calefactores que incluye el espesor de los mismos. Algunos aspectos de la modelización tridimensional de pisos radiantes hidrónicos, solares, fueron estudiados numéricamente por Alberto y Cardón (2007).

En este último trabajo, se encaró la modelización de un piso radiante hidrónico solar cuyo modelo físico consiste básicamente en una parrilla de tubos calefactores embebidos en el piso por debajo del local a calefaccionar. El piso se compone de varias capas de distinta conductividad térmica. Un esquema general del mismo se muestra en la figura 1. La superficie del piso, por zonas, se somete a una variación impuesta

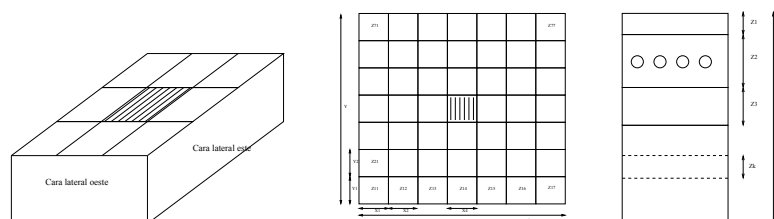


Figura 1: Esquemas que muestran los elementos generales de una configuración típica de piso radiante. Los esquemas describen, de izquierda a derecha, en volumen, plano de planta y corte transversal, respectivamente, la subdivisión en zonas del suelo y la ubicación, embebida en alguna de las zonas, de la parrilla de tubos calefactores.

de temperatura que simula el efecto de una habitación y del clima exterior. El trabajo se centró en el estudio del efecto de la aislación inferior a la parrilla calefactora.

En este trabajo se estudia el efecto de la aislación lateral perimetral. Se comparan los perfiles de temperatura del suelo en estado cuasi-permanente, para los casos a) sin aislación, b) con aislación inferior a distintas profundidades, c) con aislación inferior y aislación lateral. Se compara también la temperatura que se obtiene en el piso en los distintos casos.

EL MODELO FISICO MATEMATICO

Nuestro modelo físico de un piso radiante consiste en un serpentín de tubos calefactores embebidos en el piso por debajo del local a calefaccionar. Por simplicidad se ha reemplazado, en este trabajo, el serpentín de tubos por un arreglo de tubos paralelos o parrilla. El modelo físico-matemático que describe el modelo conceptual consiste en la ecuación del calor, con condiciones de borde adecuadas y con fuentes de calor donde deben ubicarse los tubos calefactores. El modelo fue implementado con MULTIMOD (Cardón et al., 2005). Una descripción detallada se da en Alberto y Cardón (2007).

Las capas, dimensiones y materiales del suelo se detallan en los cuadros 1, 2 y 3. Las propiedades de los

zona x	Nº Nodos	Logitud(m)	Material
1	30	3	Piso
2	3	0.05	S/C Aislación
3	20	1.95	Piso

Cuadro 1: *Definición de los materiales por zona, dirección x*

Zonas y	Nº Nodos	Logitud(m)	Material
1-8	5	0.25	Piso
9	3	0.05	S/C aislación
10	20	1.95	Piso

Cuadro 2: *Definición de los materiales por zonas, dirección y*

Capa z	Nº Nodos	Longitud (m)	Material
1	20	1.5	Piso
2	5	0.05	S/C Aislación
3	3	0.03	Piso
4	9	0.2	Piso
5	3	0.03	Piso

Cuadro 3: *Definición de los materiales por zonas, dirección z*

materiales se dan en el cuadro 4. La planta y alzada en las direcciones x e y de la red de discretización se muestran en las figuras 2a, 2b y 2c.

Potencia entregada por los colectores y clima sintético

Para simular la potencia entregada por los colectores solares y las temperaturas interior y exterior del edificio se han utilizado funciones sintéticas. La potencia máxima de la fuente de calor proporcionada por los colectores está relacionada con una experiencia en curso mientras que para la variación de radiación y de las temperaturas interior y exterior se tomaron modelos sintéticos similares a los usados por Hernández, (2001) a los efectos de comparación.

La potencia instantánea entregada por los colectores solares que operan como la caldera del sistema está simulada, en un período de 24 horas por la siguiente función

$$p(t) = P_{max} \text{sen} \left(\left(\frac{t}{3600} - 7 \right) \frac{\pi}{10} \right) \quad (1)$$

donde t es el tiempo en segundos. Para la potencia máxima entregada por los colectores, P_{max} , se ha tomado un valor de 2000 W correspondiente, aproximadamente, a valores reales medidos en un sistema de piso radiante hidrónico/solar bajo experimentación. Esta función implica que los colectores comienzan a funcionar a las 7:00 hrs, tienen su pico de potencia a las 12:00 hrs y dejan de hacerlo a las 17:00 hrs. La potencia entregada por los colectores se introduce en el término fuente de la ecuación de calor como una potencia volumétrica uniforme en los tubos calefactores cuyo valor está dado por

$$S(t) = p(t)/V_{tub} \quad (2)$$

donde $V_{tub} = 8\Delta x_t \Delta y_t L$, siendo 8 el número de tubos, L la longitud de los tubos y $\Delta x_t \Delta y_t$ el área de sección transversal de los tubos. Para el presente caso la potencia por unidad de volumen es $S \sim 300,000$

Material	Densidad kg/m^3	Conductividad W/m^2C	Calor Es- pecífico J/kgC
Piso	2400	1.73	837
Aislación	16	0.0346	

Cuadro 4: *Propiedades de los materiales empleados.*

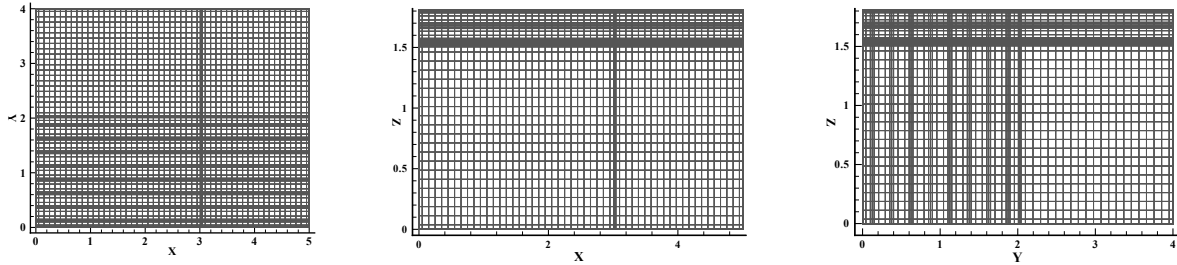


Figura 2: a) *Discretización en planta. Discretización en profundidad, planos a) xz y b) yz.*

W/m^3 . La temperatura interior de la habitación y la temperatura ambiente exterior se han simulado con las siguientes funciones.

$$T_i = T_{i_m} - 2,505 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{8640} - 1,05 \right) - 0,341 \operatorname{cos} \left(\frac{2\pi t}{8640} - 1,05 \right) \quad (3)$$

con $T_{i_m} = 18 \text{ C}$. La temperatura ambiente externa está simulada por la función

$$T_e = T_{a_m} - 10,02 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{8640} \right) - 1,257 \operatorname{cos} \left(\frac{2\pi t}{8640} \right) \quad (4)$$

RESULTADOS

Se hizo una serie de experimentos numéricos tendientes a evaluar los efectos individuales de la presencia de la aislación inferior, su profundidad y la profundidad de los tubos calefactores. Para ello se estudiaron los perfiles de temperatura en algunos puntos designados sobre el plano de planta del piso radiante. Los perfiles mostrados aquí se hicieron para el punto $(x, y) = (1,75, 0,45)$. Se estudió también la evolución temporal de la temperatura sobre la superficie del piso y la evolución de la potencia instantánea entregada por el piso al ambiente.

Comportamiento sin aislación

Las figuras 3a y 3b muestran la evolución del perfil de temperatura en profundidad para el caso sin aislación. La simulación comienza a las 0 hrs y dura 14 días. Como el punto de partida de la simulación es un estado de temperatura de suelo arbitrario, el período inicial mostrado sólo tiene importancia a los efectos de facilitar el seguimiento de la evolución posterior de la temperatura.

La figura 3a muestra la evolución del perfil de temperatura desde el estado inicial, con una temperatura inicial del suelo establecida en 16 C , por un período de dos días. Los 4 perfiles siguientes se muestran a intervalos de 12 hrs. Para $t = 12$, los calefactores han estado activos por cinco horas, desde las 7 de la mañana, y el instante corresponde con la potencia máxima entregada. Se observa un perfil anguloso, con un pico bien marcado a la profundidad de la fuente de calor. El siguiente perfil corresponde a $t = 24$. El calefactor dejó de estar activo a las 17 hrs y el perfil, redondeado, muestra un retroceso general de la temperatura.

Los siguientes dos perfiles, para $t = 36$ y $t = 48$ muestran el mismo patrón, un avance y un retroceso de la temperatura, aunque ambos a una temperatura media superior. El primero, anguloso, con temperaturas correspondientes al calentamiento máximo provocado por los calefactores, el segundo a un estado de enfriamiento intermedio, ya que los calefactores han cesado a las 17 hrs, pero no se encenderán hasta las 7 hrs del día siguiente.

Los subsiguientes perfiles muestran, analizados de a pares, este avance y retroceso de la temperatura, siempre con un desplazamiento hacia las temperaturas más elevadas. No obstante el incremento de temperatura es cada vez menor a medida que el sistema se acerca al estado permanente. Para $t > 264$, es

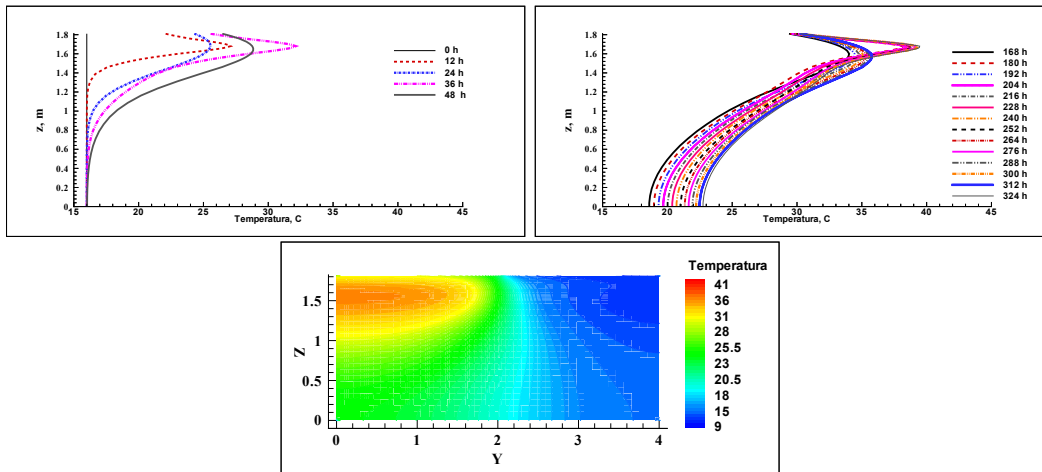


Figura 3: Evolución del perfil de temperatura para a) $0 < t < 48hr$ y para b) $168 < t < 324hr$. Sin aislación, tubos a 13cm de profundidad. c) Mapa de temperaturas a los 14 días.

decir, después de 11 días, los subsiguientes perfiles correspondientes a las cero horas y a mediodía casi se superponen con los mismos correspondientes al día siguiente. Esta superposición es menos notoria en las capas más profundas del suelo, en donde la onda de calor sigue progresando hacia abajo. Para $z = 0$ (1,8 m de profundidad), el suelo se ha calentado 7 C en el período simulado. Se advierte que, por efecto de la locación de la condición de borde, con un suelo más profundo la temperatura en el borde inferior sería un poco menor.

Efecto de la aislación

Se estudió el efecto de una placa de aislación de 5 cm de poliestireno expandido, colocada a diferentes profundidades: 26, 36 y 46 cm con y sin aislación lateral. En la figura 4 se muestra la evolución de los perfiles de temperatura correspondientes al primer caso. Para la locación central para la cual se evaluaron los perfiles no hay efecto notable de la aislación lateral.

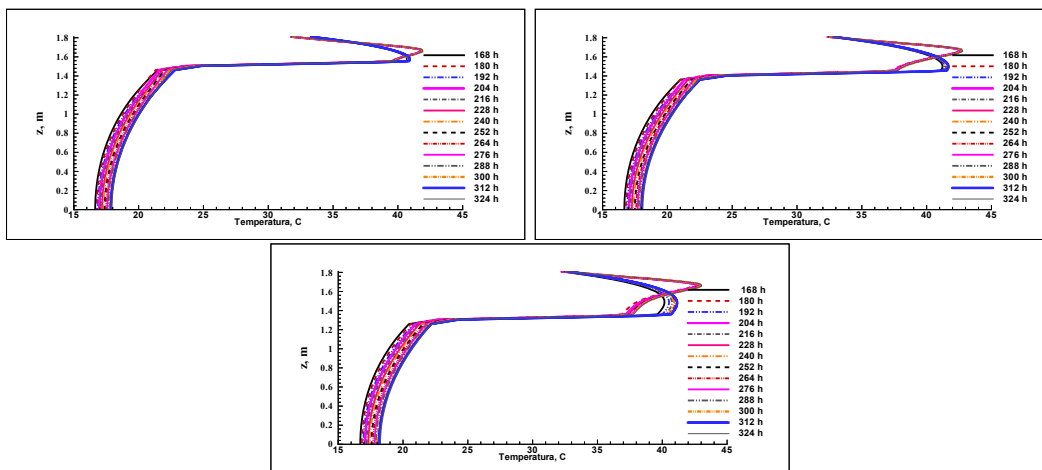


Figura 4: Evolución del perfil de temperatura $168 < t < 324 hr$. Aislación a 26, 36 y 46 cm, tubos a 13 cm de profundidad.

En la capa superficial por arriba de la aislación se observa un comportamiento similar al caso previamente estudiado, con avances y retrocesos alternados del perfil de temperatura. Se observa además, sobre todo en el perfil recesivo, las características propias introducidas por la aislación, que se manifiestan por un mayor calentamiento general en todo el piso por arriba de aquella, un mayor calentamiento de la zona profunda aledaña a la aislación, comparado con el calentamiento cerca de la superficie. Se aprecia también que, inmediatamente por arriba de la aislación, el perfil de temperatura muestra muy poca pendiente, que indica un flujo de calor muy pequeño. Se hace evidente también la fuerte caída de temperatura a través de la aislación. En los 14 días de simulación, el piso muestra en toda la profundidad por debajo de la aislación una variación de temperatura muy pequeña, menor a 4 C. La evolución del calentamiento

por debajo de la aislación, es muy lenta, y su escala temporal mucho mayor que los 14 días simulados, por lo que es de esperar que la pérdida de calor por el suelo sea en el régimen permanente aún menor. El comportamiento observado corresponde al denominado régimen tardío de calentamiento caracterizado por una escala temporal $\tau > H^2/\alpha$ y por perfiles de temperatura aplanados.

La figura 4b para el caso con aislación a 36 cm y la figura 4c para el caso de aislación a 46 cm, muestran un comportamiento similar al descrito precedentemente para 26 cm. Sólo se muestra la evolución en su aproximación al régimen permanente.

Los mapas de temperatura se muestran en la figura 5 para el caso sin aislación lateral y en la figura 6 para el caso con aislación lateral.

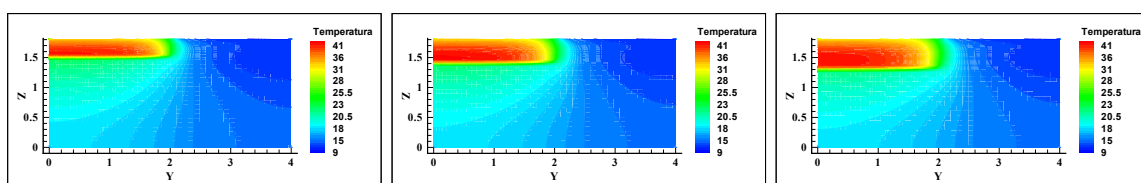


Figura 5: Mapa de temperatura en profundidad, plano $x=1$ m, a los 14 días. Aislación a: a) 26 cm, b) 36 cm, c) 46 cm, sin aislación lateral, tubos a 13 cm de profundidad.

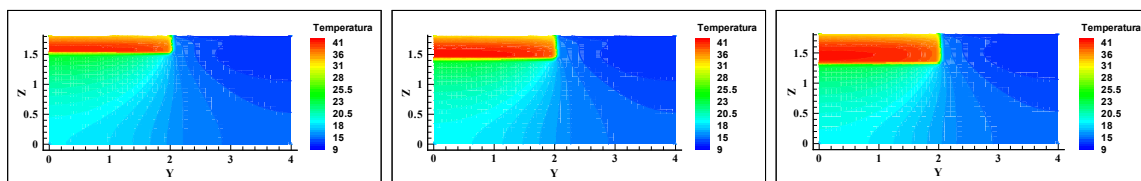


Figura 6: Mapa de temperatura en profundidad, plano $x=1$ m, a los 14 días. Aislación a: a) 26 cm, b) 36 cm y c) 46 cm, con aislación lateral, tubos a 13 cm de profundidad.

Evolución de la temperatura sobre el piso.

La figura 7 muestra la evolución de la temperatura ambiente interior y la temperatura de la superficie del piso hasta que alcanza el estado permanente. En primer lugar se observa una diferencia de aproximadamente dos grados entre el valor medio del caso sin aislación y los tres casos con aislación. Este toma el valor de 30 y 32 C para ambos casos respectivamente. La amplitud de la oscilación térmica es de aproximadamente 10 C, con un mínimo de 26 y 28 C y un máximo de 35 C y 38 C respectivamente. El retardo

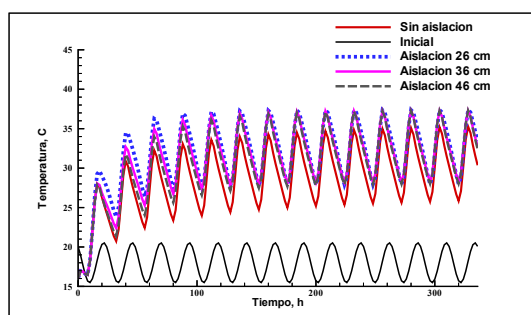


Figura 7: Evolución de la temperatura ambiente interior y la temperatura de la superficie del piso para los casos sin y con aislación.

con que se produce el pico de temperatura con respecto al pico de entrega de calor es de aproximadamente 4 hrs para los cuatro casos analizados. Debido a los parámetros temporales de la simulación no se puede dar mayor precisión ni distinguir el efecto en los casos con aislación. Este defecto se corregirá en el futuro. El retardo es importante por que permite poner en fase la entrega de energía al ambiente con el intervalo en que ésta es necesaria para calefaccionar el ambiente en las horas más frías del día.

Evolución de la potencia entregada al piso.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética es útil conocer la relación entre la potencia tomada por

los colectores y la entregada al ambiente a calefaccionar. La figura 8a muestra la evolución de la potencia útil entregada al piso para un suelo sin aislación, y con aislación a 26, 36 y 46 cm. La figura 8b muestra

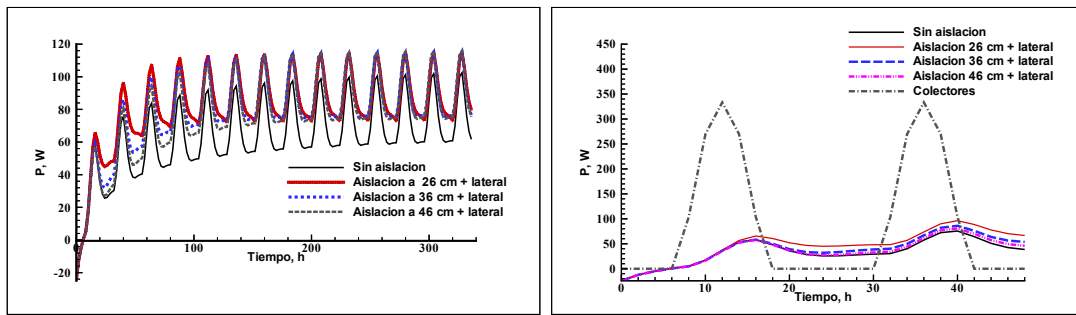


Figura 8: a) Evolución de la potencia útil entregada al piso para los casos sin y con aislación. b) Potencia de los colectores y flujo que sale en el borde en los primeros dos días.

superpuestas la potencia en el colector dividida por 6 (para que entre en escala) y la potencia entregada por el piso radiante. La relación entre estas muestra una eficiencia instantánea pobre, no obstante, para concluir sobre la efectividad del sistema se requiere estudiar más a fondo el efecto de retardo de la entrega del calor acumulado en el piso.

Efecto de la profundidad de los tubos

La profundidad de los tubos afecta el retardo entre la aplicación de la potencia calefactiva y la entrega de la misma al recinto a calefaccionar. Para estudiar este efecto se simuló un piso con aislación a 46 cm y con la parrilla de tubos a 33 cm. La evolución del perfil de temperatura para esta corrida se muestra en la figura 9

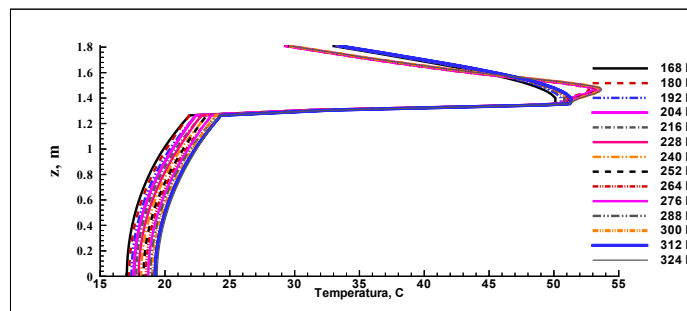


Figura 9: Evolución del perfil de temperatura para $168 < t < 324$ hr. Aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 33 cm de profundidad.

Evolución del sistema en días nublados

En el diseño de sistemas solares, debe tenerse en cuenta la posibilidad de la ausencia temporal del recurso energético. Durante los días nublados, el piso se comporta como un acumulador de calor en descarga. Para estudiar este proceso se ha simulado el funcionamiento del sistema por 14 días, hasta entrar en régimen permanente, para luego cerrar la fuente de potencia calefactiva y seguir la evolución del piso por tres días más.

Primero se ha simulado el caso sin aislación, cuyos resultados se muestran en las figuras 10a y 10b. La primera muestra la evolución del perfil de temperatura. Se observa que en el primer día la temperatura superficial cae de 30 C a 24 C. En el día subsiguiente la temperatura cae aún más, pero el efecto del piso queda ahora enmascarado por la temperatura variable del ambiente a calefaccionar. Se observa también que el piso comienza a enfriarse hasta una profundidad de 0.6 m, mientras que por debajo sigue calentándose.

La figura 11a muestra el proceso de enfriamiento del piso para el caso con aislación en el fondo a 46 cm y tubos a 33 cm de profundidad. Se observa que el proceso dura por lo menos 3 días (lapso simulado). Es interesante notar que en el período de enfriamiento la temperatura superficial permanece por arriba de 20 C. Este resultado debe ponerse en perspectiva, considerando que está influenciado por la temperatura impuesta al ambiente cuya media es 18 C. En estudios posteriores la temperatura del ambiente

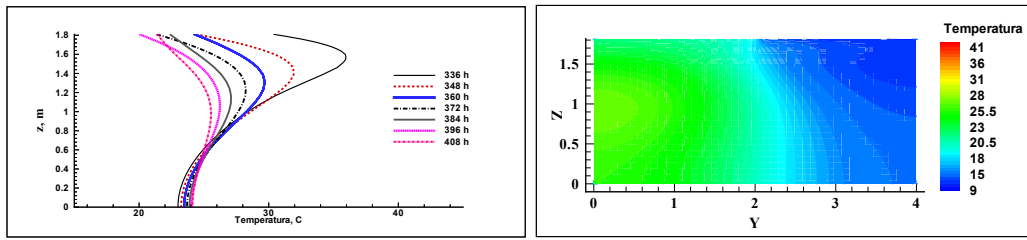


Figura 10: Evolución del perfil de temperatura, después de apagar el suministro de calor, a los 17 días, a) $336 < t < 408$ hr. Caso sin aislación, tubos a 13 cm de profundidad. b) Mapa de temperaturas.

se obtendrá del balance de calor de la habitación con lo que los resultados serán más concluyentes. La

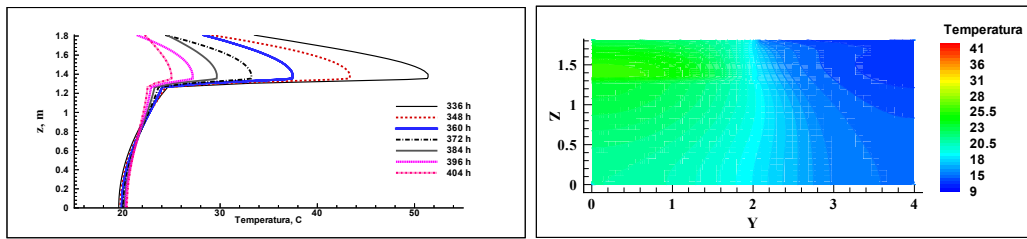


Figura 11: Evolución del perfil de temperatura para $336 < t < 404$ hr. Aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 33 cm de profundidad. Supresión de la fuente de calor después de 14 días.

figura 11b muestra el mapa de temperaturas del piso. En ella y en la figura precedente se observa que el piso por debajo de la aislación permanece a temperatura constante, un poco más de 20 C. A 80 cm de profundidad el suelo sigue calentándose muy lentamente, y sólo se enfrían, menos de 2 C, a 20 cm por debajo de la aislación.

Efecto de la aislación lateral

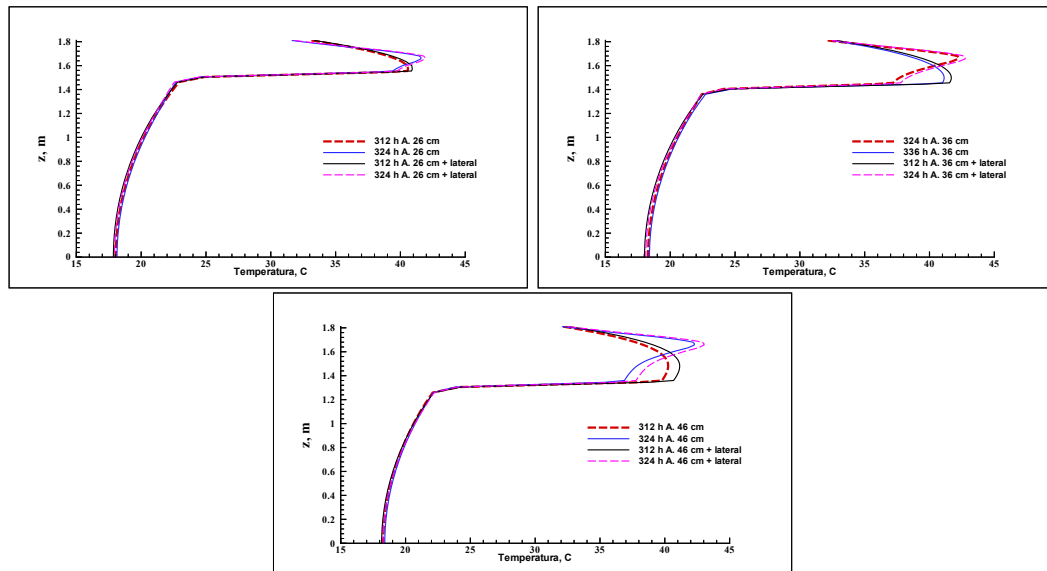


Figura 12: Perfil de temperatura a las 312 hrs y 324 hrs, con y sin aislación lateral, para aislación a a) 26 cm, b) 36 cm, c) 46 cm.

La figura 12a muestra el perfil de temperatura para el suelo con aislación a 26cm, con y sin aislación lateral. La temperatura es mayor cuando se tiene aislación lateral. Esta diferencia de temperatura es más notoria cerca de la capa aislante. La 12b y 12c muestra un comportamiento similar cuando la aislación se encuentra a 36 cm y 46 cm.

CONCLUSIONES

A los 14 días de simulación los perfiles de temperatura muestran que han alcanzado un estado permanente, con un perfil de máxima (diurno) y un perfil de mínima (nocturno) cuyas temperaturas extremas son, para el caso sin aislación, 39 y 36 C y se dan a la profundidad de los tubos. Las temperaturas extremas en la superficie, son respectivamente, 27 y 34 C . La presencia de la aislación permite una mayor acumulación de calor en el suelo, lo que se nota en un perfil nocturno menos agudo. Las temperaturas extremas del piso son 28 y 37 C , sin una diferencia notable relacionada con la profundidad de la aislación. La amplitud de la oscilación térmica en la superficie del piso es de 10 C y el retardo de la entrega de calor es de aproximadamente 4 *hrs*. Con días nublados el piso opera como un acumulador en descarga. A los tres días de suprimir el calentamiento la temperatura del piso todavía es por arriba de 20 C . La adición de aislación lateral (sumada a la aislación de fondo) produce un aumento de la temperatura inferior pico de aproximadamente 1 C medido en el centro de la habitación. El efecto se hace más notable con la profundidad de la aislación. Es de esperar un efecto mayor en los bordes de la habitación. El modelo describe cuantitativamente la operación de un piso radiante hidrónico solar y demuestra la capacidad de esta tecnología de proporcionar confort térmico.

En el futuro se cambiará el modelo sintético de temperaturas en el local por una modelización más detallada del mismo y se introducirá la variación de temperatura en la dirección de flujo en el serpentín de tubos calefactores.

Referencias

- Alberto D. and Cardón L. Efecto de la aislación inferior en la transferencia de calor en pisos radiantes calefaccionados por energía solar. *Mecánica Computacional*, 2007.
- Cardón L., Aramayo A., Barboza C., Copa B., and Alberto D. MULTIMOD v1.0: un programa para el modelado y simulación de problemas de transferencia y acumulación de calor. *ERMA*, 17:51–59, 2005.
- Hernández A. Simulación numérica de la distribución de temperatura en el suelo debajo de un edificio. In *Memorias del 8° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*, pages 242–248. 2001.
- Sattaria S. and Farhanieh B. A parametric study on radiant floor heating system performance. *Renewable Energy*, (10):1617–1626, 2006.

ABSTRACT:

The effect of the inferior and lateral insulation on the thermal behavior of solar heated hydronic radiant floor was numerically studied. The numerical model is based in MULTIMOD, and was presented by Alberto y Cardón (2007). The model describes the thermal behavior of the floor underneath a house or room and the floor exposed to exterior conditions around the house. The radiant floor is modeled as an eight heating tubes grid, embeded in one of the layers of the soil. The heated floor area was 2 $m \times 3 m$ and the total simulated floor area was 4 $m \times 5 m$ and 1,8 m deep.

Many simulations runs were done with the heating grid at 13 cm and 33 cm deep with insulation at 26, 36 y 46 cm deep in the first case and 46 cm in the second.

Keywords: hydronic radiant floor, solar energy