

## EFFECTO DE LA AISLACION INFERIOR EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN PISOS RADIANTES CALEFACCIONADOS POR ENERGIA SOLAR

Diego L Alberto<sup>a</sup> and Luis Cardón<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Mecánica Computacional, Depto. de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Av Constitución 5150, Campo Castañares, 4400 Salta, Argentina

<sup>b</sup>Grupo de Mecánica Computacional, INENCO, Depto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Av Constitución 5150, Campo Castañares, 4400 Salta, Argentina  
[cardon@unsa.edu.ar](mailto:cardon@unsa.edu.ar), <http://www.unsa.edu.ar/gmc>

**Keywords:** radiant floor, solar energy.

**Abstract.** Se estudió numéricamente el efecto de la aislación en el comportamiento térmico de pisos radiantes hidrónicos calefaccionados por energía solar. En particular se estudia el efecto de la aislación (o su ausencia) por debajo del serpentín de tubos calefactores.

Para ellos se implementó un modelo numérico que 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  $4 \times 6m$ . La planta total simulada es de  $5 \times 8m$  y de  $2m$  de profundidad.

Se realizaron varias simulaciones colocando la parrilla de tubos a  $13cm$  y a  $33cm$  con la aislación a 26, 36 y 46 cm. en el primer caso y a  $46cm$  en el segundo. Los tubos calefactores se comportan como una fuente de calor uniforme, de potencia variable. Por sobre el piso calefaccionado se imponen condiciones de borde que simulan una casa o habitación. La potencia de calefacción y las temperaturas ambiente externa e interna se modelan mediante funciones sintéticas.

El modelo se basa en la discretización con volúmenes de control de la ecuación de conducción de calor tridimensional, implementada con MULTIMOD.

## 1 INTRODUCCIÓN

La modelización de pisos y pisos radiantes ha sido objeto de creciente interés en los últimos años. El trabajo de [Sattaria and 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.

Las pérdidas de calor por el piso en viviendas térmicamente bien diseñadas, dan cuenta de hasta un 50% de las pérdidas de calor en una vivienda calefaccionada, (?). Existe numeroso trabajo experimental y de simulación sobre el tema, (????). El estado del arte en análisis y modelado pérdidas acopladas de calor/humedad en suelos de viviendas y edificios está representado por los trabajos de ? y ? de NREL, de ?, ? y ?. El último autor ha tenido en cuenta el acoplamiento no lineal energía/humedad (para lo cual desarrolló métodos numéricos eficientes), la tridimensionalidad y el acoplamiento suelo-vivienda.

Los pisos radiantes calefaccionados por energía solar presentan desafíos mayores originados por el desfase carga térmica-recurso, la intermitencia de este último, la inercia térmica, la necesidad de control de sobrecalentamiento, etc.. Los mecanismos de control fueron estudiados por ? y ?, ?. Se ha explorado los pisos radiantes cuyo fluido caloportador es aire, usado desde época ancestral en Corea, ?, ? y ?. No obstante la tendencia mundial es utilizar sistemas cuyo fluido caloportador es agua. La tecnología de pisos hidrónicos convencionales, alimentados por calderas a gas, está bien desarrollada a nivel internacional aunque tienen una pequeña penetración en el mercado local.

El objetivo de este trabajo es demostrar la capacidad de una herramienta desarrollada para la simulación computacional y diseño de pisos radiantes acoplados a sistemas solares y estudiar la influencia de la aislación inferior en la performance de pisos radiantes solares. A diferencia de la mayoría del trabajo precedente, nuestra aproximación al modelado de los pisos es tridimensional. Los tubos calefactores se han introducido con menor detalle, considerándolos como fuentes de calor, uniforme, como en el caso que se muestra aquí. Precedentemente ([Cruz et al., 2004](#)) hemos trabajado con algoritmos apropiados para resolver el problema térmico del acoplamiento entre los conductos y el suelo mediante técnicas iterativas, en los que el balance de entalpía en los tubos se resuelve alternativamente con la conducción de calor en el suelo. En este último trabajo se puso énfasis en la metodología de solución del sistema matricial de ecuaciones resultante para lo cual se utilizaron técnicas de multigrillas.

La implementación del piso radiante se hizo sobre la base del programa MULTIMOD v1.0, ([Cardón et al., 2005](#)), un programa general, para la solución de la ecuación de la energía en sólidos y fluidos adaptado especialmente a la resolución de este problema.

## 2 EL MODELO CONCEPTUAL

Nuestro modelo conceptual 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 remplazado 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. La figura 1 muestra varios esquemas que describen los elementos generales de una piso radiante típico implementado con MULTIMOD. En ella se muestra que la parrilla de tubos calefactores puede estar ubicada en cualquiera de las zonas en que se divide el suelo. En el caso mostrado en la figura, esquema de la derecha, la parrilla se encuentra en la segunda zona en profundidad y, en planta, (dos primeros esquemas de la misma figura) en la zona central. Al

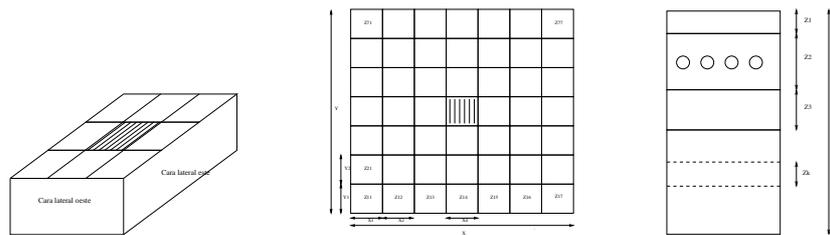


Figure 1: Esquemas que muestran los elementos generales de una configuración típica de piso radiante. Los esquemas describen, de izquierda a derecha, en volúmen, plano de planta y corte transversal, respectivamente, la subdivisión en zonas del suelo y la ubicación, embebida en alguna de las zonas, de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

contrario que el modelo conceptual, el modelo de detalle es complicado, tanto desde el punto de vista de su descripción como desde el punto de vista de su implementación computacional. La dificultad reside en que, aún en el caso más sencillo, el piso de una vivienda y el suelo de sus alrededores está constituido por capas de distinto espesor y material que requieren distinto grado de discretización. Toda esta complejidad debe ser introducida fielmente en el programa de simulación. Las estructuras creadas en MULTIMOD permiten hacer este trabajo de una manera muy eficiente.

## 2.1 Modelización de los conductos calefactores

Los tubos calefactores se modelaron como una fuente de calor de geometría lineal, implementada como una hilera de volúmenes de control (figura 2, esquema de la izquierda). Para hacer el arreglo o parrilla de tubos se utilizaron varias de las características de MULTIMOD. En particular, se utilizan agrupaciones impares de nodos como la mostrada en la figura 2, esquema central. El modelo de arreglo de tubos se realiza con redes no uniformes con lo que

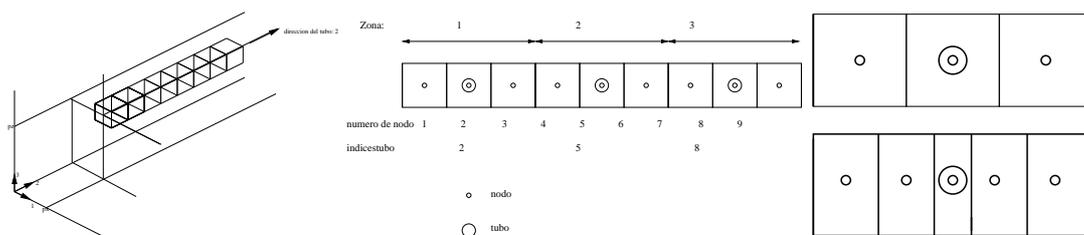


Figure 2: De izquierda a derecha se muestra: una hilera de elementos tubo, el corte transversal de la discretización de una parrilla de tres tubos y la discretización para la implementación de un solo tubo, (arriba) con una red uniforme y (abajo) con una red no uniforme.

se puede simular tubos de pequeña sección transversal sin necesidad de una discretización demasiado fina en el resto del dominio de cálculo. El esquema de la derecha, arriba, de la figura 2, muestra la estructura de volúmenes de control uniformes implementada originalmente en MULTIMOD, mientras que el esquema de la derecha, abajo, de la misma figura, muestra la estructura del nuevo método implementado. En los esquemas mostrados el tubo se indica marcando el volumen de control correspondiente con un doble círculo.

### 3 MODELO MATEMÁTICO Y NUMÉRICO

El modelo matemático está descrito por la ecuación de la energía en sólidos, que en términos de la temperatura es

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla T) + S \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $\rho$ ,  $c_p$ , son la densidad y el calor específico respectivamente.  $\mathbf{K}$  es la conductividad térmica que, en la presente implementación, es un tensor de segundo orden diagonal

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Todas las propiedades son funciones de la posición  $(x, y, z)$  y su distribución para el presente caso se describe más adelante.  $T$  es la temperatura y  $S$  es la generación de calor interna, que en este caso sólo se aplica a los tunos calefactores. Ambos dependientes de la posición y del tiempo. La propiedades de los materiales, así como la fuente pueden eventualmente depender del tiempo y/o de la temperatura.

El problema debe resolverse para  $T(x, y, z, t)$  sobre un dominio de cálculo  $\mathcal{V}$  de forma de prisma regular, sujeto a condiciones de borde sobre la frontera del dominio.

En la superficie superior se impone condiciones de borde de tipo convectivo

$$q = h(T_\infty - T) \quad \forall (x, y, z) \in \partial \mathcal{V}_R \quad (3)$$

con una temperatura del aire,  $T_\infty(t)$  función del tiempo, y simulada mediante una función de clima sintético como se describe más adelante. En los cuatro laterales se impuso condiciones de simetría que son equivalentes a la condición de Neumann con flujo nulo  $q = 0$ . Igualmente, el fondo del dominio de cálculo fue considerado adiabático. La temperatura inicial para todas las simulaciones fue impuesta a  $T = 16C$ .

#### 3.1 Implementación numérica

La discretización se hizo mediante el método de volúmenes de control en redes estructuradas tridimensionales no uniformes, ajustado a las práctica usuales recomendadas por Patankar (1980). En particular, el cálculo de los coeficientes en las caras de los volúmenes de control emplea la media geométrica entre los valores nodales y el planteo y resolución de las ecuaciones de discretización está restringido a los nodos interiores al dominio de cálculo. Los valores incógnita sobre los borde con condiciones de Neuman y Robin se calcula *a posteriori*. Los detalles de la implementación del programa MULTIMOD V1.0 se dan en (Cardón et al., 2005).

#### 3.2 Red de discretización

La red de discretización se ha definido por zonas diferenciadas por su refinamiento o por las propiedades. Las zonas se definen primero para cada dirección. La implementación de los tubos requiere una división por zonas de cinco nodos en este caso y que se distribuyen en forma no uniforme como se mostrara más arriba en los detalles de implementación de los tubos. Para el presente caso la red de discretización está definida por los parámetros mostrados en la Tabla 3.2. Las propiedades se definen también por zonas, siendo estas las definidas en las tabla 3.2, 3.2 y 3.2. Las propiedades de los materiales se dan en la tabla 5 La planta y alzada en las direcciones  $x$  e  $y$  de la red de discretización se muestran en las figuras 3 y 4.

Eje	Nº Zonas	Nº Nodos	Logitud Total(m)
$x$	3	53	5
$y$	10	63	4
$z$	5	40	1.81

Table 1: Parámetros de la discretización

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

Table 2: Definición de los materiales por zonas, 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

Table 3: Definición de los materiales por zonas, dirección  $y$

Zonas $z$	Nº Nodos	Logitud (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

Table 4: Definición de los materiales por zonas, dirección  $z$

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

Table 5: Propiedades de los materiales empleados.

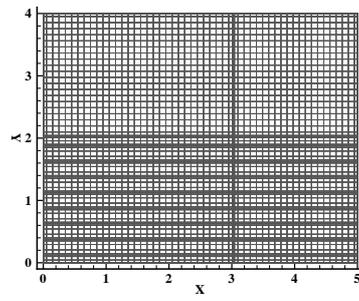


Figure 3: Discretización en el plano de planta  $xy$

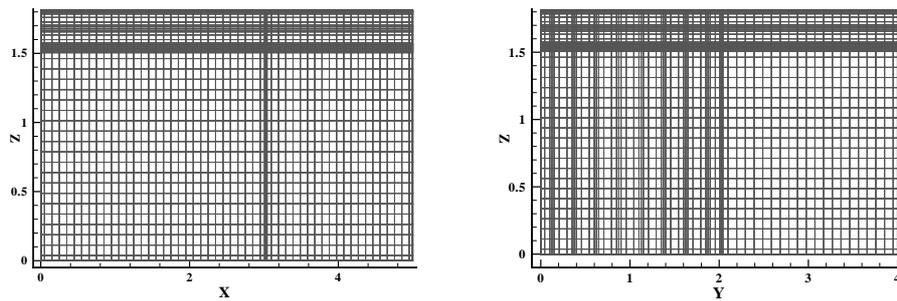


Figure 4: Discretización en profundidad, planos  $xz$  y  $yz$ .

### 3.3 Término fuente 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 la radiación y de las temperaturas interior y exterior se tomaron modelos sintéticos similares a los usados por (?) 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

$$p(t) = P_{max} \sin \left( \left( \frac{t}{3600} - 7 \right) \frac{\pi}{10} \right) \quad (4)$$

donde  $t$  tiempo en segundos. Para la potencia máxima entregada por los colectores,  $P_{max}$ , se ha tomado un valor de  $2000W$  correspondiente, aproximadamente, 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 de la mañana, tienen su pico de potencia a las 12:00 hrs y dejan de hacerlo a las 17:00 de la tarde. 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

$$S(t) = p(t)/V_{tub} \quad (5)$$

¿ 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. Par el presente caso la potencia por unidad de volumen es  $S \sim 300.000W/m^2$ . La figura 5 muestra la función  $S(t)$  para los 14 días simulados La

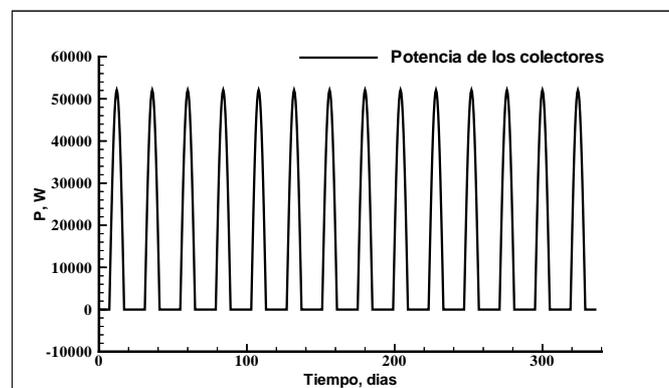


Figure 5: Potencia entregada por los colectores

temperatura interior de la habitación y la temperatura ambiente exterior se han simulado con las siguientes funciones

$$T_i = T_{i_m} - 2.505 \sin \left( \frac{2\pi t}{8640} - 1.05 \right) - 0.341 \cos \left( \frac{2\pi t}{8640} - 1.05 \right) \quad (6)$$

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

$$T_e = T_{a_m} - 10.02 \sin \left( \frac{2\pi t}{8640} \right) - 1.257 \cos \left( \frac{2\pi t}{8640} \right) \quad (7)$$

## 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. 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.

### 4.1 Comportamiento sin aislación

Las figuras 6 y 7 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.

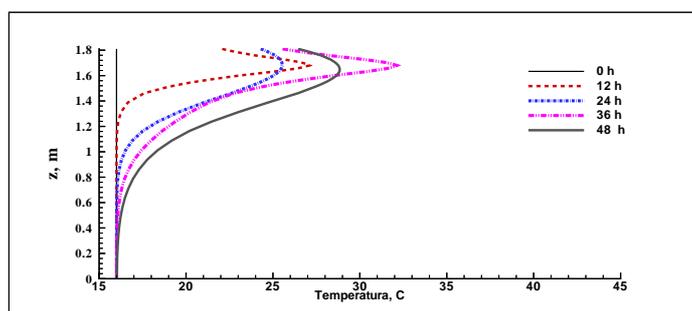


Figure 6: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 48hr$ . Caso A1: sin aislación, tubos a 13cm de profundidad.

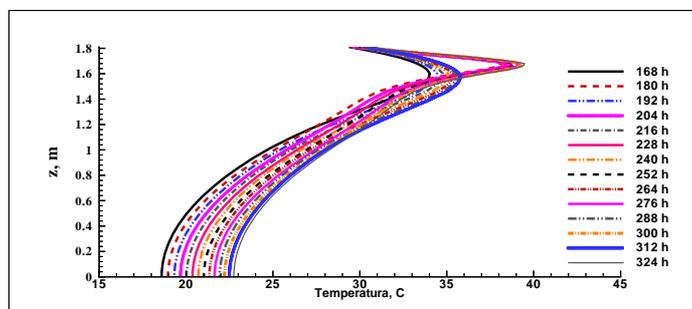


Figure 7: Evolución del perfil de temperatura para  $168 < t < 324hr$ . Caso A1: sin aislación, tubos a 13cm de profundidad.

A los efectos de facilitar la interpretación de los resultados se ha mostrado en dos figuras correspondientes dos intervalos temporales  $0 < t < 48$  y  $168 < t < 324$  respectivamente. 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 6 muestra la evolución del perfil de temperatura desde el estado inicial, con una temperatura inicial del suelo establecida en  $16C$  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 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 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  $z = 0$  ( $1.8m$  de profundidad), el suelo se ha calentado  $7C$  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 borde inferior sería un poco menor.

En la figura 20 se muestra el mapa de temperatura correspondiente.

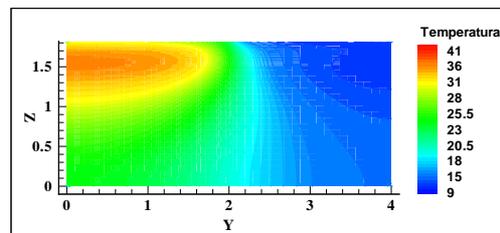


Figure 8: Mapa de temperaturas a los 14 días. Caso A1: sin aislación, tubos a 13 cm.

## 4.2 Efecto de la aislación

Se estudió el efecto de una placa de aislación de 5cm de poliestireno expandido, colocada a diferentes profundidades: 26, 36 y 46 cm. En la figura 9 y 10 se muestra la evolución de los perfiles de temperatura correspondientes al primer caso. En la capa superficial por arriba de

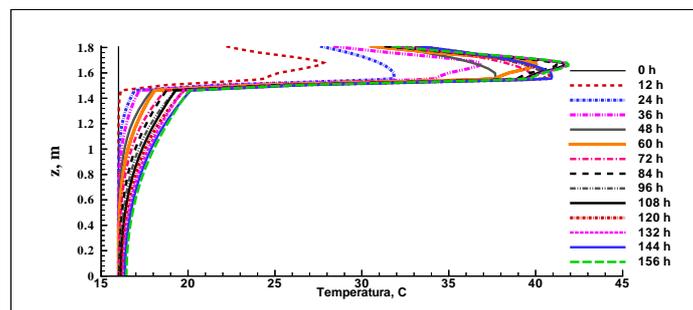


Figure 9: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 156hr$ . Caso A2: aislación en el fondo a 26cm, tubos a 13cm de profundidad.

la asilación 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 aleadaña a la asilación, comparado con el calentamiento cerca de la superficie. Se

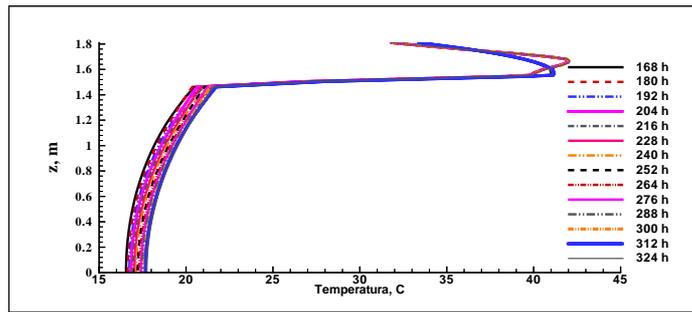


Figure 10: Evolución del perfil de temperatura para  $168 < t < 324hr$  Caso A2: aislación en el fondo a 26cm, tubos a 13cm de profundidad.

aprecia también que inmediatamente por arriba de la aislación, el perfil de temperatura muestra muy poca pendiente, indicación de 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  $4C$ . 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 aun 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 11 para el caso con aislación a 36cm y la figura 12 para el caso de aislación a 46cm, muestran un comportamiento similar al descrito precedentemente para 26 cm. Solo se muestra la evolución en su aproximación al régimen permanente. Los mapas de temperatura

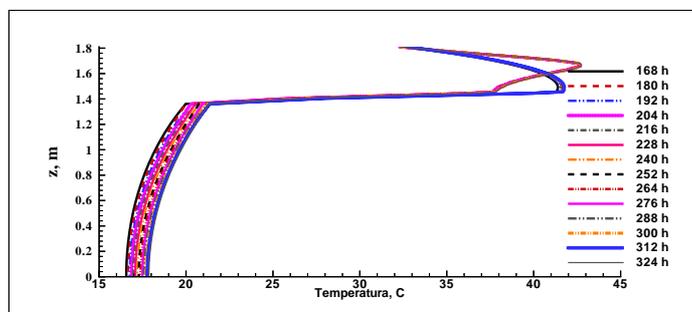


Figure 11: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 156hr$  y  $168 < t < 324hr$ . Caso A3: aislación en el fondo a 36cm, tubos a 13cm de profundidad.

se muestran en la figura 13.

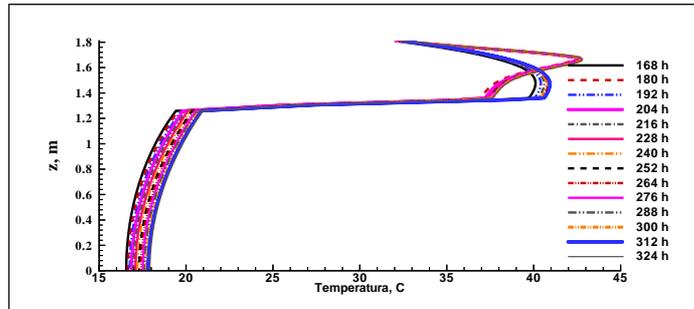


Figure 12: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 156hr$  y  $168 < t < 324hr$ ,  $x = y =$ . Caso A4: aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 13cm de profundidad.

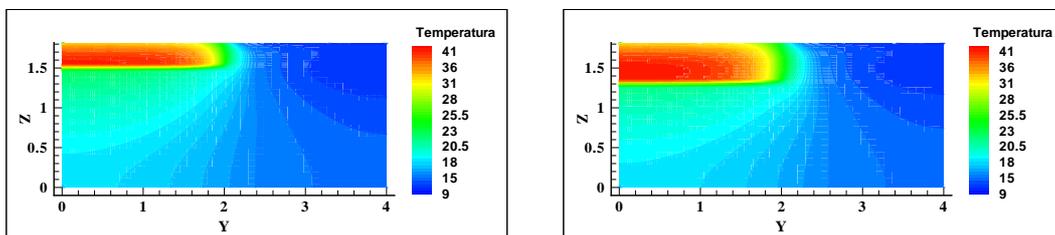


Figure 13: Mapa de temperaturas en profundidad, plano  $x = y =$ , a los 14 días. Caso A2 y A4: aislación a 26 cm y 46 cm, tubos a 13 cm.

### 4.3 Evolución de la temperatura sobre el piso.

La figura 14 muestra la evolución de la temperatura ambiente interior y la temperatura de la superficie del piso hasta que se alcanza el estado permanente. En primer lugar se observa una diferencia de aproximadamente dos grados entre el valor medio del caso sin aislamiento y los tres casos con aislamiento. Este valor medio toma el valor de 30 y 32 C para ambos casos respectivamente. La amplitud de la oscilación térmica es de aproximadamente de 10 C, con un mínimo de 26 y 28 C y un máximo de 35 y 38 respectivamente. El retardo con que se produce

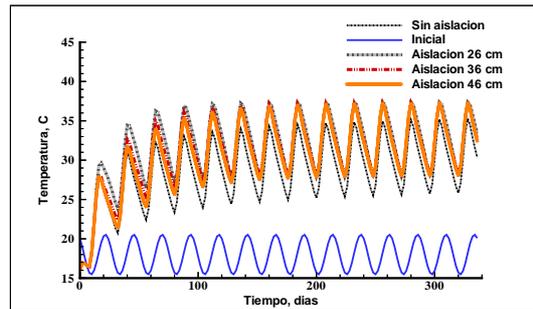


Figure 14: Evolución de la temperatura ambiente interior y la temperatura de la superficie del piso pra los casos A, A1, A2, A3, A4.

el pico de temperatura con respecto a 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 advertir mayor precisión ni distinguir el efecto en los casos con aislamiento. 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.

### 4.4 Evolución de la potencia entregada el piso.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética es util conocer la relación entre la potencia tomada por los colectores y la entregada al ambiente a calefaccionar. La figura 15 la evolución de la potencia util entregada al piso para los casos A, A1, A2, A3 y A4. La figura ?? muestra

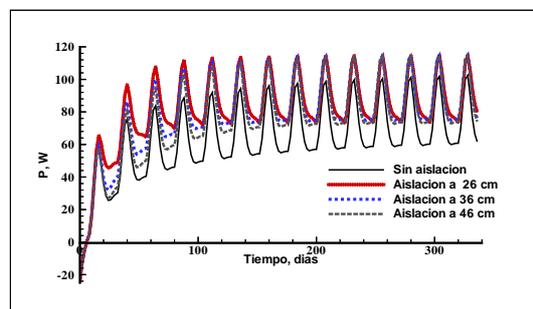


Figure 15: Evolución de la potencia util entregada al piso para los casos A, A1, A2, A3 y A4.

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 instantanea pobre, no obstante, para concluir sobre la efectividad del sistema se requiere estudiar más a fondo el efecto de de retardo de la entrega del acolor acumulado en el piso.

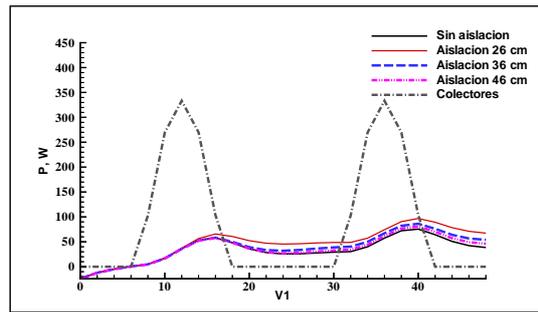


Figure 16: Potencia de los colectores y flujo que sale en el borde en los primeros dos días

#### 4.5 Efecto de la profundidad de los tubos

La profundidad de los tubos está relacionada con el retardo entre la aplicación de la potencia calefactora y la entrega de la misma al recinto a calefaccionar. Para estudiar este efecto se simuló un piso, con aislación a 45 cm, y con la parrilla de tubos a 33 cm. La evolución del perfil de temperatura para esta corrida se muestra en las figuras ?? y 18

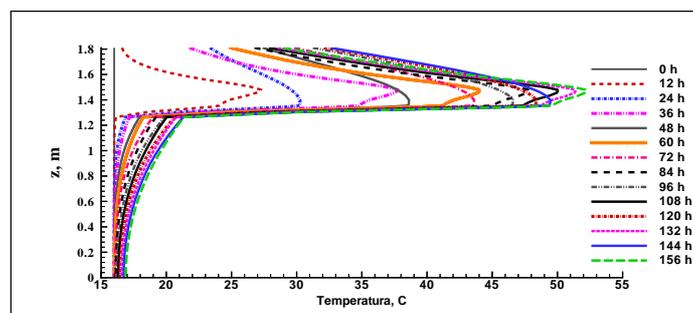


Figure 17: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 156hr$ . Caso B1: aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 33cm de profundidad.

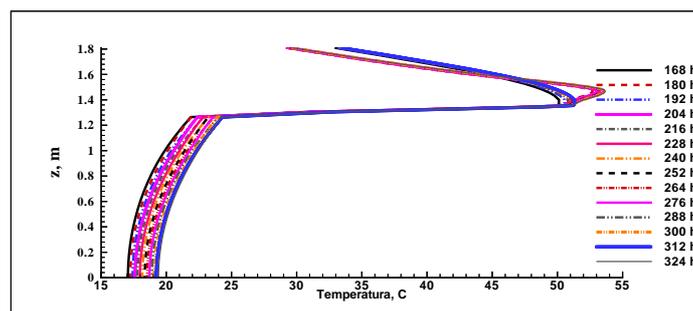


Figure 18: Evolución del perfil de temperatura para  $168 < t < 324hr$  Caso B1: aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 33cm de profundidad.

#### 4.6 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 que entra en estado estacionario, para luego cerrar la fuente de potencia calefactora 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 19 y 20. La primera muestra la evolución del perfil de temperatura. Se observa que en el primer día la temperatura superficial cae de 30 C a 24C. En el día subsiguiente la temperatura cae aun 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 1.2 m, mientras que por debajo sigue calentándose

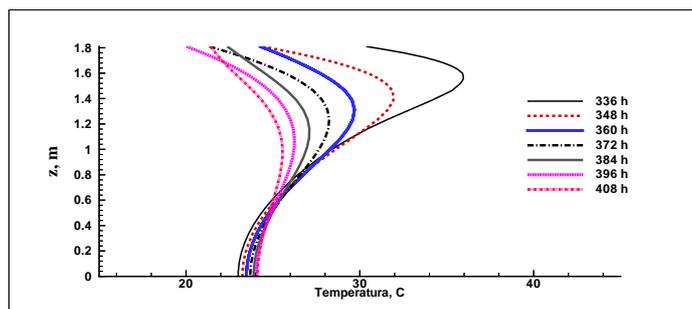


Figure 19: Evolución del perfil de temperatura, después apagado el suministro de calor,  $324 < t < 408hr$ . Caso sin aislación, tubos a 13cm de profundidad.

La figura 20 muestra el mapa de temperatura correspondiente.

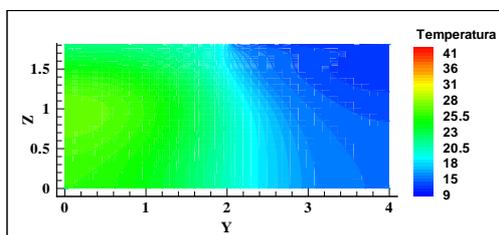


Figure 20: Sin aislación, 26cm, tubo 13 cm. En 17 días

La figura 21 muestra el proceso de enfriamiento del piso para el caso con aislación en el fondo a 46 cm y tubos a 33cm de profundidad. Se observa que el proceso dura por lo menos 3 días (lapso simulado). Es interesante nora que en el periodo 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 se obtendrá del balance de calor de la habitación con lo que los resultados serán más concluyentes. La figura 22 muestra el mapa de temperaturas del piso. En ela y en la figura precedente se observa que el psio 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 los 20 cm por debajo de la aislación.

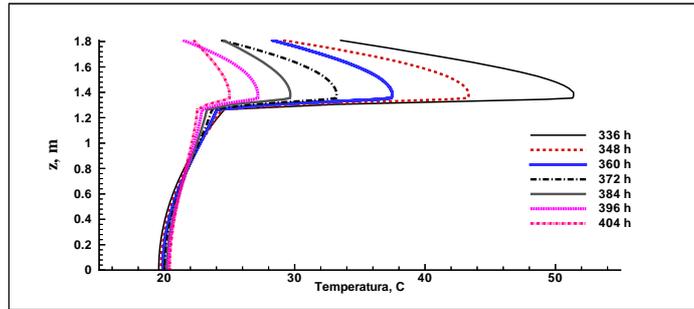


Figure 21: Evolución del perfil de temperatura para  $0 < t < 156hr$  y  $168 < t < 324hr$ . Caso C1: aislación en el fondo a 46 cm, tubos a 33cm de profundidad. Supresión de la fuente de calor después de 14 días.

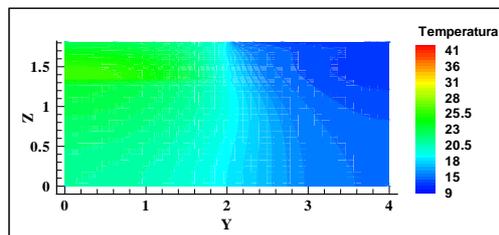


Figure 22: Detalle de la variación de temperatura al finnal de la simulación. Aislación en el fondo, 46cm, tubo 33 cm. Temperatura al final de la simulación. En 17 días caja uno

## 5 CONCLUSIONES

Se utilizó y modificó el programa MULTIMOD v1.0 para simular las características principales del comportamiento de pisos radiantes calefaccionados por energía solar. Se estudió el efecto de la aislación inferior en las temperaturas en la superficie del piso y el calor entregado al ambiente a calefaccionar. Se estudió también el efecto de la profundidad del serpentín calefactor. Por último se estudió la respuesta del sistema a la supresión de potencia calefactora propia de días nublados.

Las simulaciones y resultados mostraron que el programa es una herramienta útil y versátil para la modelización de pisos radiantes. El programa y los resultados obtenidos se usarán en el futuro para diseñar sistemas de calefacción basados en pisos radiantes hidrónicos solares y para evaluar la performance de los mismos.

A los efectos de perfeccionar la calidad de los resultados y aproximarlos más aún a la realidad física, se incluirán, en una versión posterior: a) el cálculo de balance de calor en los tubos, lo que introduce una no uniformidad en la distribución de calor b) el balance térmico entre la habitación, el piso y el exterior, con lo que se podrá estudiar el efecto del piso radiante solar como único medio de calefacción.

## REFERENCES

- 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.
- Cruz M., Canterle M., and Cardón L. Simulación de intercambiadores de calor de tipo conducto enterrado. *Mecánica Computacional*, 23:2097–2110, 2004.
- Sattaria S. and Farhanieh B. A parametric study on radiant floor heating system performance. *Renewable Energy*, (10):1617–1626, 2006.