

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DE UNA UNIDAD DE SUELO FRÍO CON VENTILACIÓN INCORPORADA

FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Francisco⁽¹⁾; CEJUDO LÓPEZ, José Manuel⁽¹⁾

FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, Alberto⁽¹⁾; DEL PINO PEÑAS, Carlos⁽²⁾

franciscofh@uma.es

⁽¹⁾Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Grupo de Energética

⁽²⁾Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Grupo de Mecánica de Fluidos

RESUMEN

En los últimos años se ha empezado a utilizar sistemas de suelo frío para combatir parte de la carga sensible de los locales. Como la temperatura superficial del suelo está limitada por el riesgo de condensación, un sistema de suelo frío suele ir complementado con un sistema de ventilación que combate el resto de carga sensible que el suelo no es capaz de combatir, además de la carga de ventilación y la carga latente del local.

Para unificar las unidades terminales, se propone en este estudio una integración del suelo frío con el sistema de ventilación [1]. El sistema consiste en una estructura modular que se dispone en el forjado y forma conductos de ventilación por donde circula el aire. Sobre esta estructura se coloca la red de tuberías, que quedan embebidas en la capa de mortero y sobre la que se dispone el acabado superficial del suelo. Las bocas de difusión se sitúan en el suelo, pudiendo ser ventilación por mezcla o desplazamiento.

El trabajo que se presenta es un análisis numérico de la transferencia de calor en la unidad terminal de suelo frío con ventilación, mediante elementos finitos, realizado con el software COMSOL Multiphysics [2]. Además, se realiza un ensayo experimental. Se integra el sistema en un suelo de 3x3 m² y se realiza un ensayo típico en condiciones de verano. Se describe el montaje del experimento, la monitorización llevada a cabo de los parámetros más importantes del sistema y el ensayo experimental. Se muestran los resultados experimentales, que confirman la estratificación de temperatura del aire de la zona. Por otro lado, la temperatura superficial media del suelo y la capacidad de refrigeración del sistema son dos de las variables utilizadas para comparar el ensayo experimental con la simulación numérica.

El objetivo principal es validar el modelo numérico con los ensayos experimentales.

El trabajo se encuadra en el proyecto UNICLIMA, financiado por AZVI en el marco de un proyecto de la Corporación Tecnológica de Andalucía y el CDTI.

Palabras clave: Suelo radiante, sistema de ventilación, unidad terminal conjunta, modelado físico, ensayo experimental

1. Introducción

Los sistemas radiantes de climatización tienen importantes ventajas frente a los basados en la impulsión de aire frío y seco: temperaturas de producción más elevadas con el consiguiente aumento en el rendimiento de la producción, mejor integración arquitectónica, flexibilidad frente a cambios en la compartimentación de los locales, etc. Sin embargo, al no utilizar el aire como elemento caloportador, requieren un sistema de ventilación que suministre el aire exterior requerido por la normativa [3]. El aire de ventilación previamente tratado combate la carga latente y la sensible que el suelo no es capaz de combatir.

La aplicación de un suelo radiante frío con un sistema de ventilación por desplazamiento es muy interesante para la climatización de grandes volúmenes de aire, como aeropuertos, estaciones, museos, etc. Zhao [4] estudia este sistema en el aeropuerto de Xi'an Xianyang (China) y demuestra las ventajas en términos de confort y eficiencia energética respecto a los sistemas convencionales de aire.

Siguiendo esta línea de investigación, se propone un nuevo sistema que integra el suelo radiante con el sistema de ventilación en una única unidad terminal. El aire de ventilación circula por conductos horizontales situados por debajo de la capa de suelo radiante y se impulsa a la zona mediante un difusor situado en cualquier parte del recinto. Una unidad de este tipo tendría ventajas significativas respecto a los sistemas por separado: mejora la integración del sistema de ventilación, mejora la convección entre el aire y el suelo, potenciando el mecanismo convectivo de transferencia de calor, y minimiza el riesgo de condensación, porque el aire en contacto con el suelo sería el exterior, una vez se haya tratado, en lugar del aire del local.

Para caracterizar la unidad terminal es necesario el modelado físico de la misma. En la literatura existen modelos muy variados del comportamiento térmico de suelos radiantes [5-6]. En el caso de estudio, al incorporar los conductos de ventilación en el suelo radiante se cuestiona la hipótesis de conducción unidimensional. Además, aunque comúnmente se considera el régimen cuasiestacionario, la presencia del aire de ventilación que circula por el interior de los conductos practicados en el suelo radiante, cuya inercia térmica es menor, provoca cambios en las condiciones de contorno del suelo que fuerzan la consideración del régimen transitorio para el modelado del sistema.

El trabajo que se presenta consiste en un análisis numérico de la transferencia de calor en esta unidad, cuya solución se obtiene mediante elementos finitos y un ensayo experimental que permite validar el modelo numérico. El trabajo se centra en la parte térmica, excluyendo el estudio del aire de ventilación.

1. Descripción del sistema.

La unidad terminal que integra el suelo radiante y el sistema de ventilación consiste en una estructura modular que se coloca sobre el forjado o capa constructiva, creando secciones de paso por donde circula el aire de ventilación. Sobre ésta se dispone la red de tuberías, que es cubierta con una capa de mortero de nivelación y el acabado superficial del suelo. Las estructuras se encajan unas con otras creando pasos de aire hasta las bocas de difusión, que estarían situadas en el suelo. En la Fig. 1 se muestra un esquema de la unidad terminal.

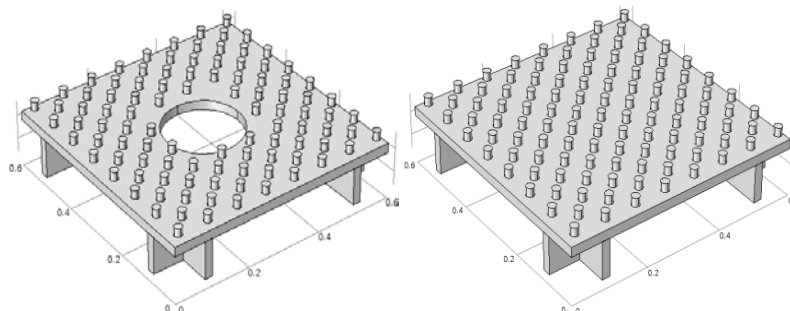


Figura 1: Unidad terminal de suelo frío con conductos de ventilación con y sin hueco para el difusor.

2. Modelado del sistema.

Se propone un modelo tridimensional y en régimen transitorio, cuya solución se obtiene mediante elementos finitos. Se utiliza el software COMSOL Multiphysics para la simulación del sistema. Las ecuaciones de transferencia de calor que gobiernan el proceso están descritas en [1]. El análisis del sistema completo comprende el acoplamiento de tres procesos diferentes: la transferencia de calor entre el agua y los tubos, la conducción de calor entre el tubo y el hormigón, y la transferencia de calor con el aire de ventilación que circula por los conductos horizontales por un lado, y con el aire de la zona, por otro. Este último proceso se modela mediante coeficientes de transferencia de calor.

Entre el aire de ventilación y la unidad terminal se desprecia la radiación y el coeficiente convectivo se calcula a partir del número de Nusselt y las correlaciones adimensionales en convección forzada flujo interno [7]. Entre el suelo y el aire de la zona se considera un coeficiente de transferencia de calor convectivo-radiante cuyo valor se obtiene de la literatura [8].

3. Ensayo experimental.

3.1. Montaje del ensayo.

Se describe el montaje experimental para el estudio del comportamiento térmico de la unidad terminal propuesta. Para ello se ha construido un suelo de $3 \times 3 \text{ m}^2$ que asemeja a la unión de 25 módulos unidos entre sí. A expensas de la fabricación de los módulos de polietileno (PET), se recurre a una estructura de cartón prensado (Fig. 2a). La zona inferior del suelo por donde circula el aire de ventilación tiene una altura de 8 cm. Éste se introduce a través de un conducto por una de las esquinas del suelo. El módulo central incorpora el hueco donde se sitúa el difusor de aire, con un diámetro de 22 cm. Sobre esta estructura se dispone una capa de corcho de 2.5 cm de espesor como aislamiento en la que se apoyan los tubos. Se disponen en forma de espiral (Fig. 2b). Los tubos son de polietileno de 16.2/20 cm de diámetro. La separación entre tubos es de 18 cm. El mortero se vierte sobre las tuberías para formar una capa uniforme de 3 cm de espesor (Fig. 2c). Con el objetivo de crear un espacio interior en el que las condiciones del aire se mantengan estables, se monta una carpa de lona de 2.5 m de altura (Fig. 2d).

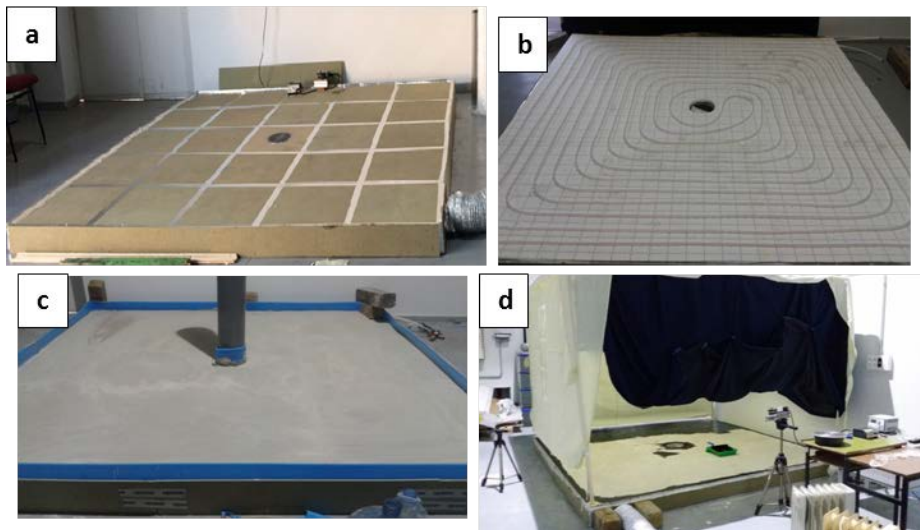


Figura 2: Montaje del ensayo experimental.

3.2. Monitorización del experimento. Instrumentación.

Una vez montado el sistema hay que suministrar el aporte térmico que permita simular las condiciones típicas de un día de verano. Como los ensayos se realizan en el mes de enero, se utilizan unos radiadores que se sitúan en el interior de la zona para elevar la temperatura del aire en torno a $27\text{-}28^\circ\text{C}$. Una bomba de calor de laboratorio PolyScience “Heated Circulating Bath”, con un controlador digital, regula la temperatura de entrada del agua al suelo a la temperatura deseada.

Para el estudio del comportamiento térmico del sistema, es necesaria una monitorización exhaustiva del experimento. Las medidas se registran cada 5 minutos.

Temperatura superficial del suelo

La temperatura de la superficie del suelo se mide mediante 8 sensores de temperatura y humedad tipo Hobo U12. El suelo se divide en 9 cuadrados iguales de 1 m^2 y se coloca un sensor en el centro de cada uno de ellos, excepto en el central donde se sitúa el difusor. Se utiliza una sonda de contacto y pasta térmica, que permite una adherencia total. Además, la sonda se cubre para evitar que la radiación afecte a las medidas. Además de los sensores, se ha utilizado una cámara termográfica para comprobar la uniformidad de temperaturas superficiales. Cada cierto tiempo se realizan fotos a cada una de las 9 áreas (de 1 m^2) en las que se divide el suelo, dejando la sonda de temperatura superficial en el centro. De esta manera se obtiene un mayor conocimiento de la distribución de temperatura cada una de las superficies en las que se ha dividido el suelo.

Temperatura del aire y de las superficies

Para medir la temperatura del aire se utilizan 5 sensores de temperatura y humedad, dos Hobo U12 y tres Hobo U23. En experimentos anteriores se comprueba que la temperatura del aire es uniforme en dirección x e y (ver Fig. 3), por lo que los sensores se cuelgan mediante cuerdas a diferentes alturas (5, 75, 100, 130 y 150 cm) con el objetivo de comprobar si se produce una estratificación de la temperatura de la zona. Por otro lado, es necesario conocer las temperaturas de las superficies circundantes (paredes y techo) para el cálculo de la temperatura operativa. Se ha utilizado una cámara termográfica que, de forma periódica, mide la distribución de temperatura en cada una de las superficies.

En la Fig. 3 se muestra un esquema general de la monitorización del suelo (3a) y del aire (3b).

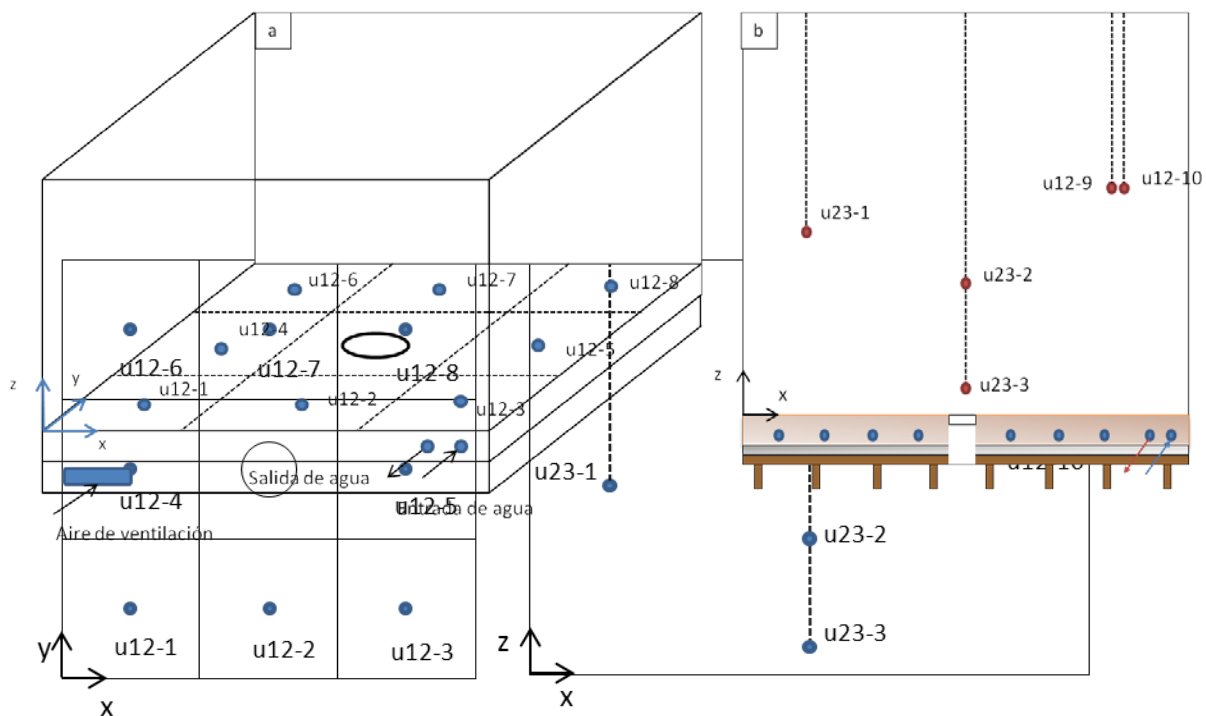


Figura 3: Posición de los sensores. a) Temperatura superficial. b) Temperatura del aire.

Sección frontal.

Temperatura y caudal de agua.

La temperatura de entrada del agua al suelo se regula a través del controlador digital de la bomba de calor. A la salida, se ha colocado un termómetro PT100 con sonda para medir la temperatura del agua y, de esta manera obtener el salto térmico que tiene lugar en el suelo. Además, se ha instalado un caudalímetro que mide el caudal de agua.

La Fig. 4 muestra imágenes de la monitorización del sistema.

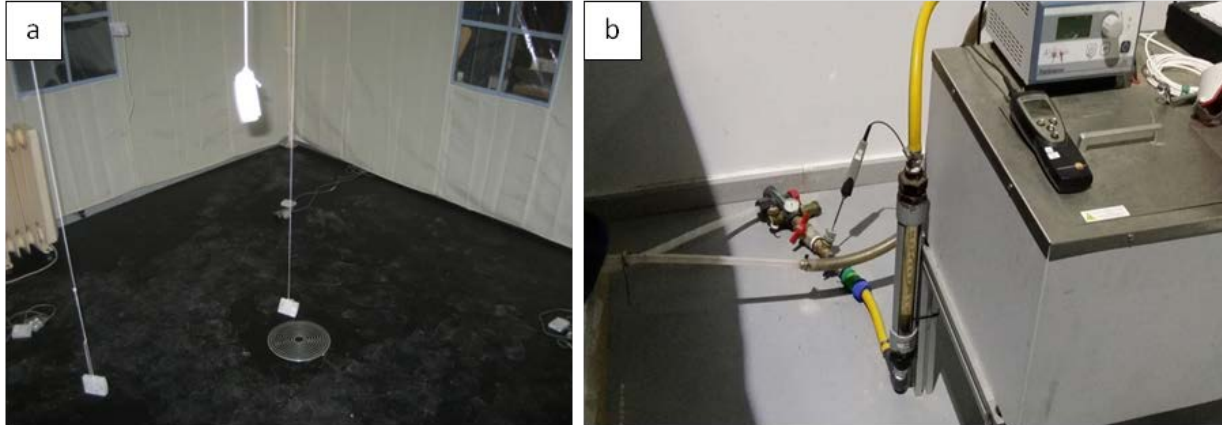


Figura 4: a) Sensores U12 y U23 colocados en la zona. b) Medida del caudal y la temperatura de entrada y salida del agua.

3.3. Descripción del ensayo del experimento.

El ensayo se realiza en enero de 2015. Como el objetivo es simular un día de verano se utilizan dos calefactores que calientan el aire de la zona hasta 27-28°C. Se mide la temperatura inicial del hormigón, que es de 15°C, más baja que en verano, que suele estar en torno a 25°C.

Para conseguir una respuesta transitoria del sistema es necesario un calentamiento del suelo hasta una temperatura próxima al ambiente. Se programa una temperatura de producción de agua de consigna de 35°C y a las 8:55 horas se inicia el experimento. El agua de entrada, inicialmente a 22°C y con un caudal de 0.042 kg/s, tarda 30 minutos en alcanzar la consigna de 35°C. El proceso de calentamiento se mantiene hasta las 10:10 horas, instante en el que la temperatura superficial media del suelo es de 26.1°C. En ese momento se inicia el proceso de enfriamiento. Se programa entonces una temperatura de entrada de agua de 15°C. El objetivo es disminuir la temperatura superficial del suelo hasta conseguir que la variación sea despreciable, instante en el que se habrá conseguido alcanzar el estado estacionario. Hasta las 11:35 horas (1 hora y 25 minutos después) no se alcanza la consigna de 15°C. La operación del sistema se mantiene hasta las 14:30 horas, donde se observa que la variación en la temperatura superficial del suelo ha sido de apenas 0,1°C en los últimos 30 minutos.

Durante todo el periodo se han realizado fotografías con la cámara termográfica, en intervalos de 15-20 minutos. Las fotografías al suelo se realizan desde una altura de 2 metros y en perpendicular a la superficie con la ayuda de una escalera. También se realizan fotografías a las paredes y techo.

4. Validación del modelo numérico.

4.1. Resultados experimentales.

Tras la realización del ensayo y la monitorización de los parámetros se muestran los resultados obtenidos. Las mediciones de la temperatura del aire permiten comprobar que existe estratificación de temperaturas (Fig.5).

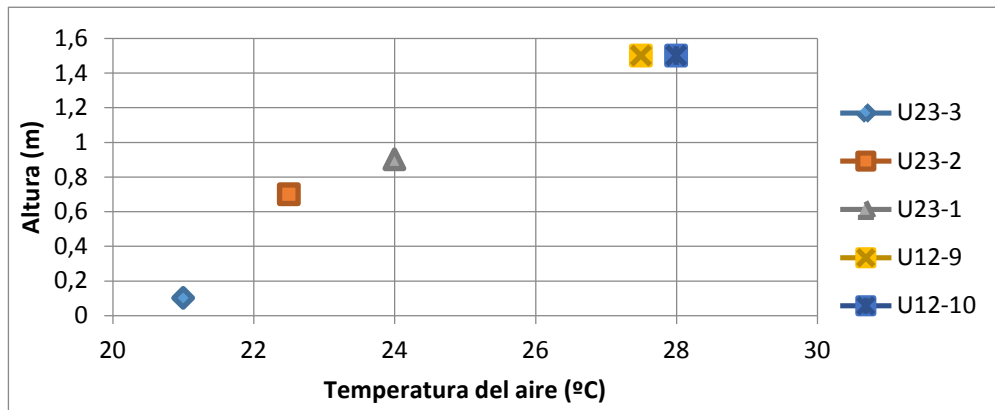


Figura 5. Perfil vertical de la temperatura del aire de la zona.

Según la UNE-EN ISO 7730:2006 [9] una gran diferencia entre la cabeza y los tobillos puede dar lugar a la incomodidad. En la Fig. 5 se observa que hay 7°C de diferencia entre el suelo y una altura de 1.6 m, lo que supondría un PD (porcentaje insatisfechos) en torno al 50%. La incorporación de la capa de solado y la impulsión de aire ventilación tratado va a disminuir esta diferencia de temperaturas y obtener un PD más favorable.

La temperatura media superficial del suelo se obtiene como la media de las ocho medidas realizadas por los Hobo U12 (Fig. 6a). Se usan las fotografías realizadas por la cámara termográfica para comprobar si la sonda está encima de un tubo (figura 6b), lo que permite identificar desviaciones de la medida respecto a las demás. También se hacen fotos a las paredes y techo para obtener la evolución de la temperatura operativa. Además, se ha identificado que las medidas de las sondas cercanas a los radiadores son más altas que el resto.

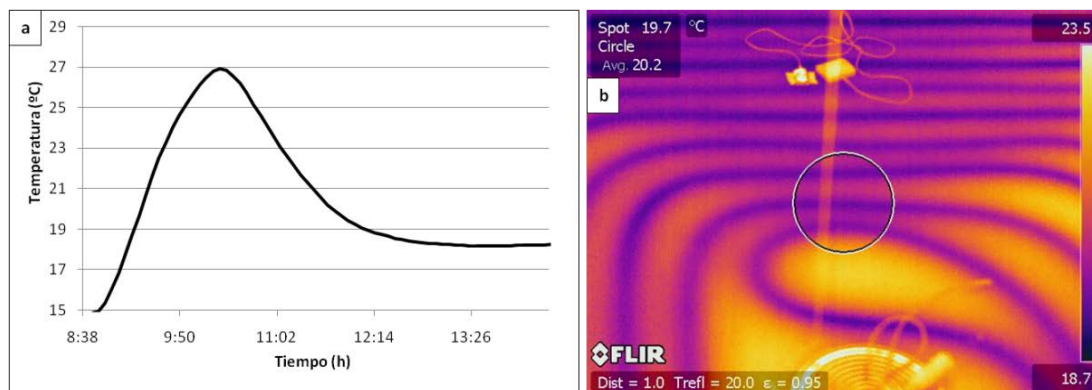


Figura 6. a) Temperatura media superficial del suelo. b) Imagen infrarroja de una parte del suelo.

4.2. Simulación de la unidad terminal experimental. Comparación con los resultados experimentales.

Parámetros de la simulación.

La comparación de los resultados obtenidos en el ensayo experimental y de la simulación del sistema en COMSOL Multiphysics va a permitir validar el modelo numérico. Para ello es necesario que se realice la simulación de la unidad terminal en las mismas condiciones que han tenido lugar en el experimento. La temperatura operativa resultante a lo largo del experimento y la temperatura de entrada del agua, son variables de entradas en la simulación. En la superficie del suelo se supone un coeficiente convectivo-radiante de 6.5 W/m²K. En el conducto de ventilación se desprecia la radiación y se calcula el coeficiente convectivo cuyo valor es de 16 W/m²K. Se define una malla secuencial controlada en el que el dominio es discretizado en tetraedros, que forman una malla no estructurada con un mallado más fino en la zona de los tubos, así como en las zonas de contacto entre las diferentes

capas de suelo, y un mallado grueso en el resto. En la figura 7 se muestra una imagen de la geometría del sistema (Fig. 7a) la malla en el hueco del difusor (Fig. 7b).

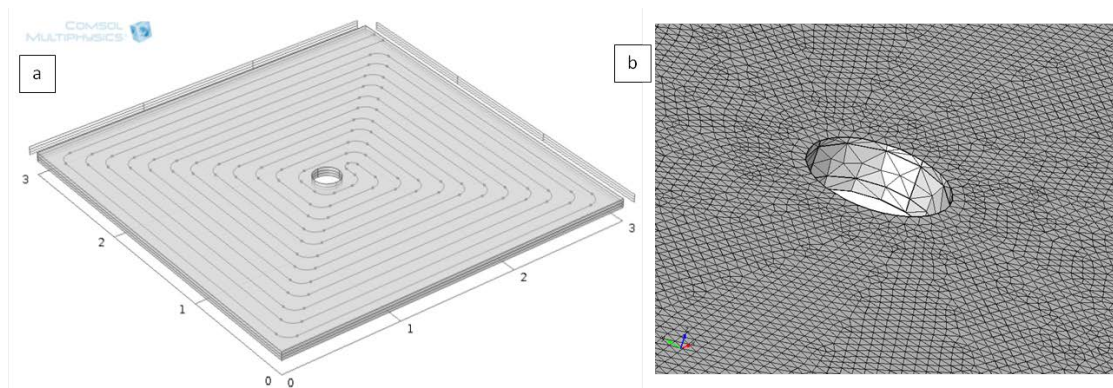


Figura 7: a) Geometría del sistema en Comsol. b) Detalle de la malla.

Comparación de los resultados experimentales con la simulación.

En la primera simulación (Fig. 8a) se observa que ambas curvas siguen la misma evolución, pero hay diferencias importantes. En la simulación, la temperatura del suelo es inferior a la medida en el entorno del máximo. La diferencia es 1.6°C en el punto máximo. Posteriormente, el enfriamiento se produce de forma más lenta, sin llegar al estado estacionario hasta los instantes finales, 3 horas y 48 minutos después del experimento. Estos resultados iniciales predicen un comportamiento del modelo numérico en los que el suelo no es tan conductivo como el del experimento y tiene una mayor inercia, lo que provoca que su respuesta sea más lenta.

Para corregir este comportamiento se modifican las propiedades térmicas del mortero, que se han obtenido de los catálogos del fabricante. Tras algunas pruebas, se aumenta la conductividad de 1.5 a 1.8 W/mK y la densidad de 1500 a 1750 kg/m^3 . La Fig. 8b muestra que las diferencias entre ambas curvas son ahora menores. En el punto máximo la diferencia se ha reducido a 0.4°C . En el proceso de enfriamiento ambas curvas tienen prácticamente la misma forma y alcanza el régimen estacionario en el mismo momento, con una temperatura media del suelo de 18.5°C .

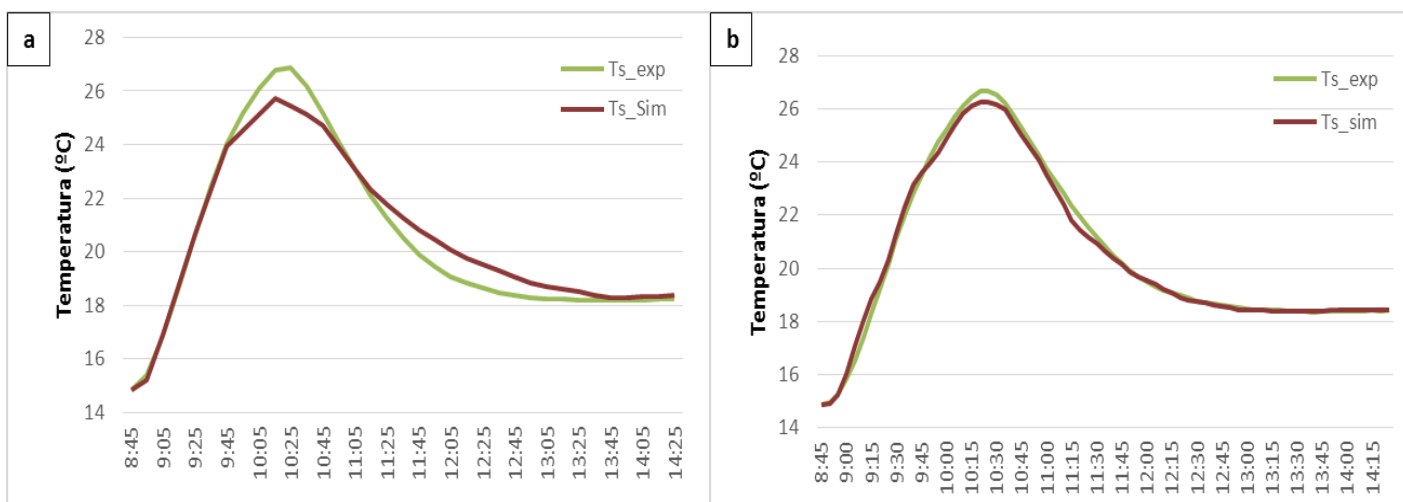


Figura 8: a) Comparación temperatura media del suelo. Primera simulación. b) Comparación temperatura media del suelo ajustando los parámetros térmicos del mortero.

Para dar por válido el modelo detallado se comprueba que se cumple el balance de energía. La energía que se lleva el agua es igual a la energía almacenada en el mortero más la energía intercambiada entre el suelo y el aire de la zona. Para ello se representa la energía que se lleva el agua, lo que permite valorar la capacidad de refrigeración del suelo en el estado estacionario (Fig. 9).

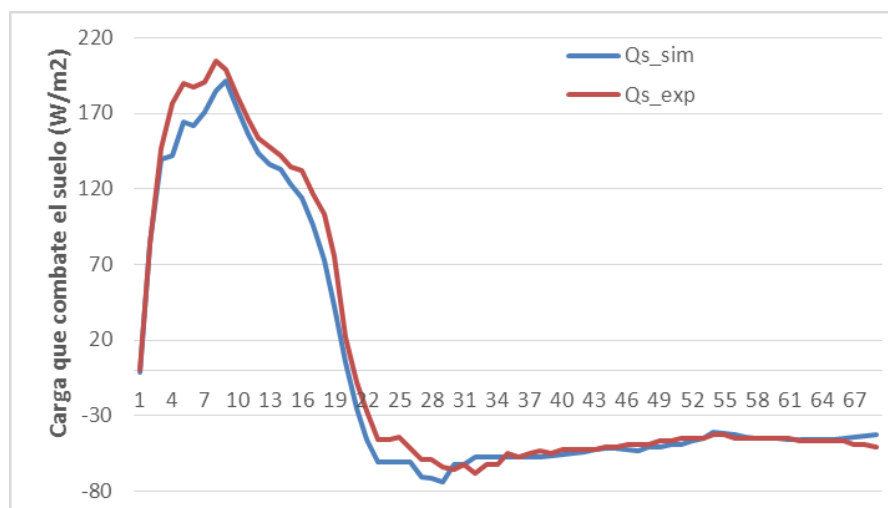


Figura 9: Comparación de la carga que combate el suelo en el experimento y en la simulación.

En el parte transitoria del proceso, la curva de simulación está por debajo del experimento, con un error mayor en el final del proceso de calentamiento. Al alcanzar el estado estacionario, ambas curvas se superponen y el error es mínimo. La carga de refrigeración en el estado estacionario es de 48 W/m^2 . Por lo tanto, se puede afirmar que se ha validado el modelo numérico.

5. Resumen y conclusiones

Se presenta el ensayo experimental de una unidad terminal que integra un suelo radiante con un sistema de ventilación. Los resultados del ensayo se utilizan para validar el modelo numérico del sistema, realizado en Comsol Multiphysics. El estudio se centra en el comportamiento térmico del sistema sin incluir el aire de ventilación.

Se ensaya el sistema para la refrigeración de una zona simulando un día característico de verano. Para conseguir el carácter transitorio del sistema es necesario que el suelo pase por un proceso de calentamiento para, posteriormente, iniciar el enfriamiento hasta que alcance el estado estacionario. Los resultados experimentales confirman que debido al suelo radiante, se produce una estratificación de temperaturas en la zona.

La primera simulación revela diferencias en la temperatura media del suelo con respecto a los resultados experimentales. El suelo del modelo numérico es menos conductivo y con más inercia. La modificación de las propiedades térmicas del mortero permiten ajustar los resultados y obtener una diferencia en la temperatura media del suelo menor de 0.4°C .

Finalmente se comparan los resultados de capacidad de calefacción y refrigeración del suelo. Los errores entre ambas curvas se consideran lo suficientemente pequeños para confirmar la validación del modelo numérico.

6. Referencias

- [1] F. Fernández Hernández, J.M. Cejudo López, F. Domínguez Muñoz, A. Carrillo Andrés. Unidad terminal de suelo frío con ventilación incorporada. VII Congreso Ibérico de Ciencias y Técnicas del Frío. Tarragona 18,19 y 20 de Junio 2014. Universidad Rovira i Virgili.
- [2] COMSOL Multiphysics. <http://www.comsol.es/comsol-multiphysics>. (Consulta: 8 de enero de 2014).
- [3] Documento Básico HE1 del Código Técnico de la Edificación (CTE). BOE 12/09/2013 con corrección de errores del BOE 08/11/2013.
- [4] K. Zhao, X. Liu, Y. Jiang. On-site measured performance of a radiant floor cooling/heating system in Xi'an Xianyang International Airport. Solar Energy, 2014, vol 108, pp. 274-286.

- [5] A. Laouadi. Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. *Building and Environment*, 2004, vol 39, pp. 421-431.
- [6] X. in, X. Zhang, Y. Luo, R. Cao. Numerical simulation of radiant floor cooling system: The effects of thermal resistance of pipe and water velocity on the performance. *Building and Environment*, 2010, vol 45, pp. 2545-2552.
- [7] E.A. Rodriguez, *Fundamentos de Climatización, Capítulo 4, Transferencia de calor en climatización*, Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr), 2010.
- [8] T. Cholewa, M. Rosinski, Z. Spik. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room. *Energy and Buildings*, 2013, vol 66, pp. 599-606.
- [9] UNE-EN ISO 7730-2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.