



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO DE FIN DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG:** Estudio sobre la optimización del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores aplicado a una terminal aeroportuaria.

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales

**AUTOR:** Blai Izquierdo Falces

**DIRECTOR:** José Antonio Castán Ponz

**FECHA:** 22 de octubre del 2021



**Título:** Estudio sobre la optimización del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores aplicado a una terminal aeroportuaria.

**Autor:** Blai Izquierdo Falces

**Director:** José Antonio Castán Ponz

**Fecha:** 22 de octubre del 2021

## Resumen

El objetivo principal de este trabajo es optimizar el rendimiento del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores. El sistema de refrigeración por suelo refrescante es mucho menos conocido que el sistema de calefacción por suelo radiante, fundamentalmente debido a las peculiaridades e inconvenientes que tiene. Entre los más importantes cabe destacar dos: el riesgo de condensación y la baja capacidad de enfriamiento.

Para solventar el primero ya existen avanzados sistemas de deshumidificación que minimizan enormemente el riesgo de condensación.

El segundo inconveniente desaparece cuando la luz solar incide directamente sobre el suelo, este hecho multiplica la capacidad de enfriamiento.

En consecuencia, los edificios con grandes zonas acristaladas en idóneos para la instalación del suelo refrescante, como podría ser una terminal aeroportuaria.

Pese a la disminución del riesgo de condensación y al aumento de la capacidad de enfriamiento, sigue existiendo el problema más evidente, el aire frío es más denso que el aire caliente y por lo tanto se estanca en zonas cercanas al suelo haciendo imposible que se produzca un flujo convectivo de forma natural.

Es justamente este punto el que se aborda en este trabajo, la generación de un flujo convectivo artificial mediante el uso de ventiladores. Durante el proyecto se han realizado múltiples simulaciones con programa SolidWorks, con distintos parámetros y condiciones iniciales, para determinar la forma más óptima de instalar los ventiladores, teniendo en cuenta su velocidad angular, así como la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante. Los resultados demuestran que algunas de estas configuraciones sí que contribuyen de forma importante a la generación de una corriente convectiva.

**Title:** Radiant floor cooling optimization study through the use of fans applied to an airport terminal.

**Author:** Blai Izquierdo Falces

**Director:** José Antonio Castán Ponz

**Date:** October 22, 2021

## Overview

The main objective of this work is to optimize the performance of the radiant floor cooling through the use of fans. The radiant floor cooling system is much less known than the conventional radiant floor system, mainly due to its peculiarities and drawbacks. Among the most important, two should be highlighted: the risk of condensation and low cooling capacity.

To solve the first, there are already advanced dehumidification systems that greatly minimize the risk of condensation.

The second drawback disappears when sunlight hits the ground directly, this fact multiplies the cooling capacity. It makes buildings with large glazed areas ideal for installing radiant floor cooling, such as an airport terminal.

Despite the reduction in the risk of condensation and the increase in cooling capacity, the most obvious problem still exists: cold air is denser than hot air and therefore stagnates in areas close to the ground, making it impossible for a convective flow to occur naturally.

It is precisely this point that is addressed in this project, the generation of an artificial convective flow through the use of fans. During the project, multiple simulations have been carried out with SolidWorks, with different parameters and initial conditions, to determine the most optimal way to install the fans, taking into account their angular velocity, as well as the cooling capacity of the radiant floor cooling. The results show that some of these configurations do contribute significantly to the generation of a convective current.



# ÍNDICE

Introducción.....	8
Capítulo 1. Climatización por suelo refrescante. Características y aplicaciones principales .....	9
1.1 Proceso de intercambio de calor de un sistema de suelo refrescante ....	10
1.1.1 Intercambio de calor por convección.....	10
1.1.2 Intercambio de calor por radiación de onda larga .....	11
1.1.3 Intercambio de calor por radiación de onda corta .....	12
1.1.4 Resultados experimentales en la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an .....	12
1.2 Confort térmico .....	14
1.3 Eficiencia Térmica .....	14
1.3.1 Análisis del estudio realizado en la estación de tren de Tianjin .....	15
1.4 Aplicaciones prácticas del suelo refrescante .....	16
1.4.1 Aplicaciones en climas moderados .....	16
1.4.2 Aplicaciones en climas cálidos y húmedos .....	16
1.5 Consideraciones e inconvenientes en las aplicaciones prácticas.....	18
1.5.1 Acumuladores térmicos sobre la superficie.....	18
1.5.2 Capacidad de enfriamiento muy variable .....	19
1.5.3 Influencia del aire infiltrado del exterior .....	19
1.5.4 Obstáculos sobre la superficie .....	19
Capítulo 2. Optimización del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores .....	21
2.1 Mediciones experimentales de la capacidad de enfriamiento mediante el uso de ventiladores.....	21
2.1.1 Limitaciones del estudio .....	22
2.2 Simulaciones realizadas con SolidWorks .....	23
2.2.1 Limitaciones y simplificaciones aplicadas a la simulación.....	23
2.2.2 Características y condiciones iniciales comunes en todas las simulaciones .....	25
2.2.3 Configuración de la simulación .....	25
2.3 Simulaciones con los ventiladores instalados en el techo .....	26
2.3.1 Rotación horaria vs antihoraria .....	27
2.3.1 100 W/m <sup>2</sup> vs 200 W/m <sup>2</sup> .....	28
2.3.3 300 RPM vs 600 RPM.....	29
2.4 Ventiladores instalados en el suelo .....	30
2.4.1 Rotación horaria vs antihoraria .....	31
2.4.2 100 W/m <sup>2</sup> vs 200 W/m <sup>2</sup> .....	32

2.4.3 300 RPM vs 600 RPM.....	33
2.4.4 5 Ventiladores vs 9 Ventiladores .....	34
Capítulo 3. Análisis de los resultados.....	35
3.1 Consideraciones previas.....	35
3.2 Comparación de los resultados obtenidos con los ventiladores instalados en el techo. ....	35
3.3 Comparación de los resultados obtenidos con los ventiladores instalados en el suelo. ....	36
Conclusiones.....	38
Bibliografía .....	40

## Introducción

El sistema de calefacción por suelo radiante es ampliamente conocido por el público en general, descrito de forma simplificada consiste en la instalación de tuberías por debajo del suelo por las que circula agua caliente, esta agua transfiere calor al suelo y este, al aire que tiene inmediatamente encima creando una corriente convectiva que produce bastantes beneficios tanto en la eficiencia energética como en el confort térmico.

El inconveniente es que si se desea refrigerar el ambiente durante los meses de verano es necesario instalar un sistema alternativo, como podría ser un sistema el aire acondicionado convencional. Ahora bien, ¿Qué sucede si por los tubos del suelo radiante se introdujese agua fría? De ahora en adelante a este sistema se le llamará suelo refrescante para diferenciarlo del anterior.

El suelo refrescante tiene algunos inconvenientes añadidos: el riesgo de condensación y la baja capacidad de enfriamiento. Este proyecto se centrará especialmente en el segundo.

Los resultados experimentales, que serán desarrollados posteriormente, demuestran que la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante aumenta de forma drástica cuando la luz solar incide directamente sobre la superficie del suelo. Este hecho explica porque la mayoría de sistemas de climatización por suelo radiante/refrescante se hayan instalado en edificios amplios con grandes zonas acristaladas que permiten la incidencia de la radiación solar sobre la superficie del suelo. Una terminal aeroportuaria se adapta perfectamente a estas características.

Pese a la mejora en la capacidad de enfriamiento, sigue existiendo el problema más evidente. El aire se enfría sobre el suelo, aumenta su densidad, haciendo imposible que se cree una corriente convectiva de forma natural.

El objetivo principal de este trabajo es analizar que eficacia podría tener la instalación de ventiladores para crear esa corriente convectiva de forma artificial. Este análisis se ha realizado con la ayuda del programa SolidWorks. Este programa tiene una función que permite analizar el comportamiento de un fluido en múltiples configuraciones. De esta manera se han realizado simulaciones variando el lugar en el que se instalan los ventiladores, su velocidad angular, así como la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante.



## Capítulo 1. Climatización por suelo refrescante. Características y aplicaciones principales

Los sistemas de climatización por suelo radiante/refrescante vienen siendo una de las alternativas más prometedoras a los sistemas HVAC (Calor, Ventilación y Aire Acondicionado, del inglés, Heating, Ventilation, and Air Conditioning) durante los últimos años. Se están implementando con éxito en grandes edificios y superficies como en la Terminal 3 del Aeropuerto Internacional de Xi'an en China o en el Aeropuerto Internacional de Suvarnabhumi en Tailandia<sup>1</sup>.

La refrigeración por suelo refrescante mejora el confort térmico y la eficiencia energética con respecto a los sistemas más tradicionales<sup>2</sup>. Sin embargo, los sistemas de suelo refrescante no han sido tan populares como los sistemas de suelo radiante debido fundamentalmente al riesgo de condensación y a la baja capacidad de enfriamiento<sup>1</sup>.

Con el desarrollo de la tecnología de deshumidificación, se puede evitar la condensación de la humedad en la superficie del suelo mediante el suministro de aire seco procedente del exterior<sup>3</sup>, además cuando la radiación solar incide directamente sobre el suelo refrescante, esta mejora enormemente la capacidad de enfriamiento<sup>4</sup>.

Los grandes edificios como las terminales aeroportuarias suelen estar dominadas por fachadas acristaladas, lo que propicia que el ambiente en el interior esté caracterizado por una alta incidencia de la radiación solar, y por paredes que alcanzan grandes temperaturas, a diferencia de otros edificios más convencionales. En consecuencia, es en este tipo de edificios donde se han instalado la mayoría de los sistemas de refrigeración por suelo refrescante. En la Fig. 1 se observan algunos de los edificios en los que se ha optado por instalar este sistema.



Fig. 1 (a) Aeropuerto de Bangkok; (b) Aeropuerto Internacional de Xi'an; y (c) Teatro de la ópera en Copenhague<sup>1</sup>.

## 1.1 Proceso de intercambio de calor de un sistema de suelo refrescante

En los sistemas de refrigeración por suelo refrescante, el agua fría se introduce mediante un circuito cerrado de tuberías en una capa de hormigón, esto forma una superficie de baja temperatura en el interior del suelo. Es en este punto cuando se produce el intercambio de calor entre la superficie del suelo y el volumen de aire que hay en el interior, las superficies de las paredes etc<sup>5</sup>. La transferencia de calor se produce tanto por convección, como por radiación (onda larga) tal y como se puede observar en la Fig. 2. También hay que tener en cuenta la radiación solar (onda corta) que incide en el interior del edificio y es absorbida por la superficie del suelo.

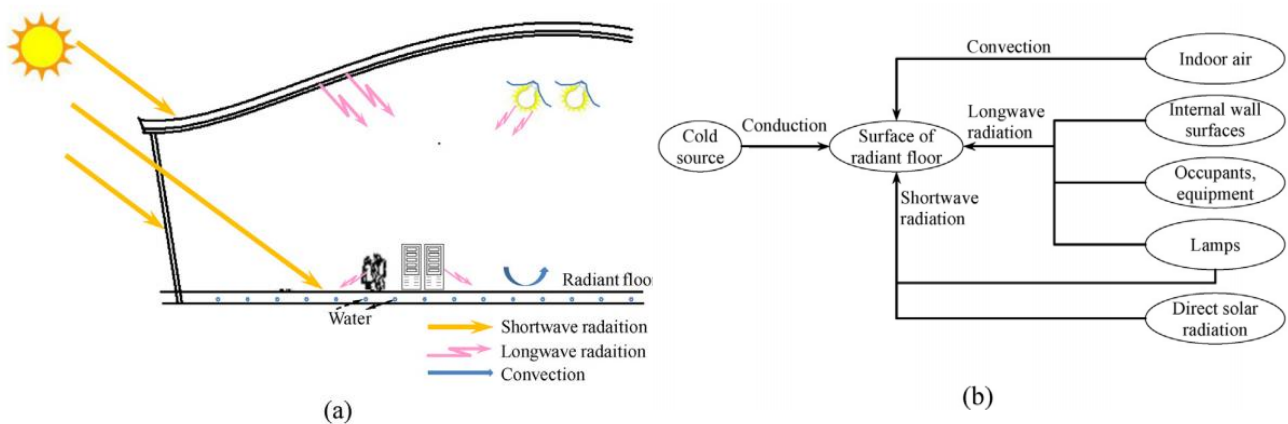


Fig. 2. Transferencia de calor de un suelo refrescante con el entorno<sup>5</sup>.

### 1.1.1 Intercambio de calor por convección

El intercambio de calor por convección está directamente relacionado con la diferencia entre la temperatura interior del aire ( $T_a$ ) y la temperatura de la superficie del suelo ( $T_s$ ). En el caso del suelo refrescante, es prácticamente marginal debido a que el aire en contacto con la superficie del suelo se enfría, aumentando su densidad y permaneciendo estancado sobre la superficie del suelo. Este hecho propicia que la diferencia de temperaturas entre la superficie del suelo y el aire sea muy pequeña y en consecuencia tanto el flujo de calor convectivo ( $q_c$ ), como el coeficiente de intercambio de calor convectivo ( $h_c$ ), sean muy pequeños, tal y como se muestran en las Ecs. 1 y 2<sup>6,7</sup>. Para el cálculo de  $q_c$  se medirá la temperatura del aire ( $T_a$ ) a una altura de 1,1m para las personas que estén de pie y 0,6m para las personas sentadas.

$$q_c = h_c(T_a - T_s) \quad (1)$$

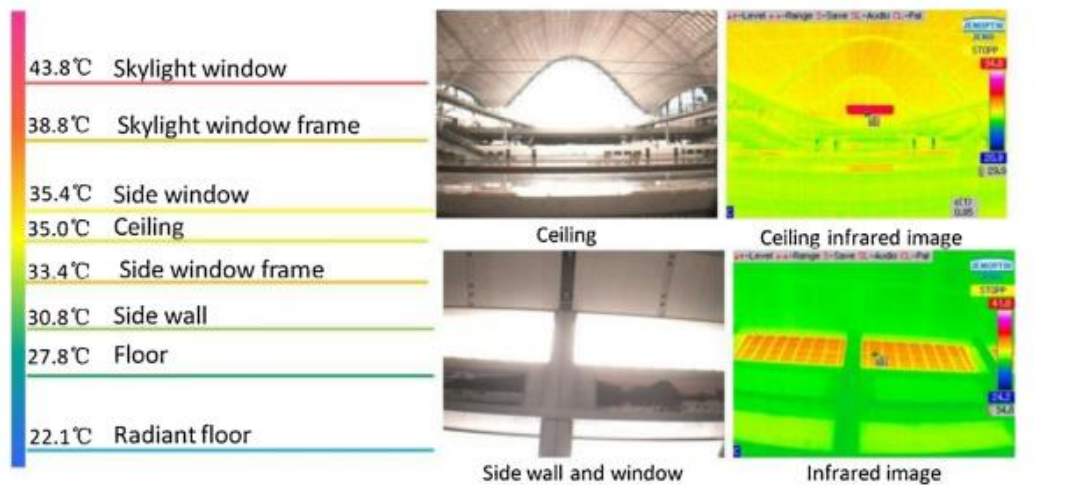
$$h_c = 0.87(T_a - T_s)^{0.25} \quad (2)$$

El objeto fundamental de este trabajo es mejorar el flujo de calor convectivo ( $q_c$ ) con la instalación de ventiladores que induzcan un flujo vertical de aire que

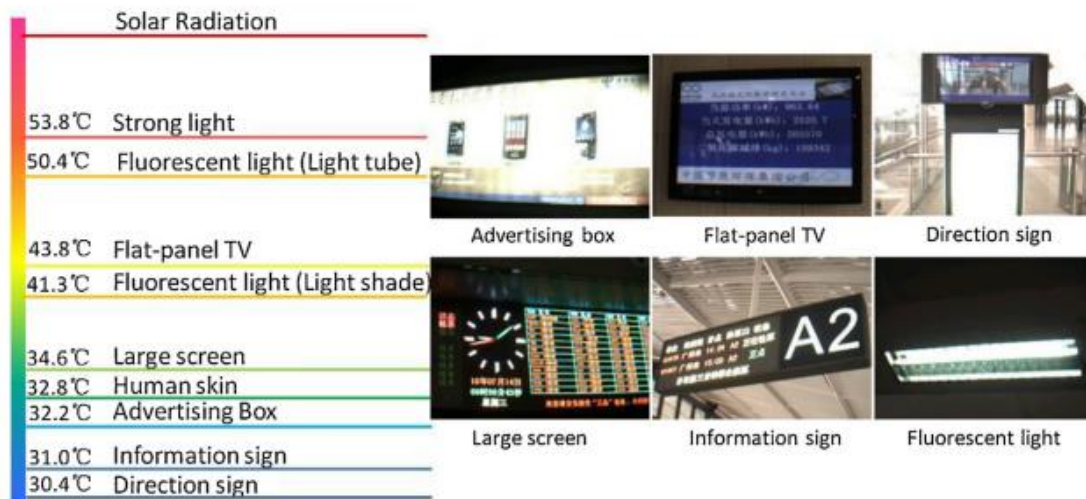
sustituya al aire frío sobre la superficie del suelo por aire más caliente. Aumentado el flujo de calor convectivo.

### 1.1.2 Intercambio de calor por radiación de onda larga

El intercambio de calor por radiación de onda larga depende en gran medida de la emisividad. La emisividad es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura, por lo tanto, dependido de los materiales con los que se construya y de los objetos que haya en el interior, la emisividad variará.



(a)



(b)

Fig. 3. Distribución de la temperatura de la superficie interior en una terminal aeroportuaria:

(a) superficies internas y (b) fuentes de calor interiores<sup>5</sup>.

El intercambio de calor por onda larga es bastante difícil de calcular con precisión debido a la gran cantidad de materiales distintos que se utilizan en la construcción de grandes edificios como puede ser una terminal aeroportuaria, tal y como se puede apreciar en la Fig. 3.

### 1.1.3 Intercambio de calor por radiación de onda corta

La radiación de onda corta corresponde a la radiación solar que incide directamente en el interior de un edificio, como en el caso anterior también depende de un importante número de variables: la orientación de las ventanas, las propiedades térmicas del acristalamiento, los objetos que pueden producir sombras sobre la superficie del suelo, etc. En el caso del suelo refrescante contribuye enormemente a aumentar su capacidad de enfriamiento como se puede ver en la Fig.4<sup>8</sup>

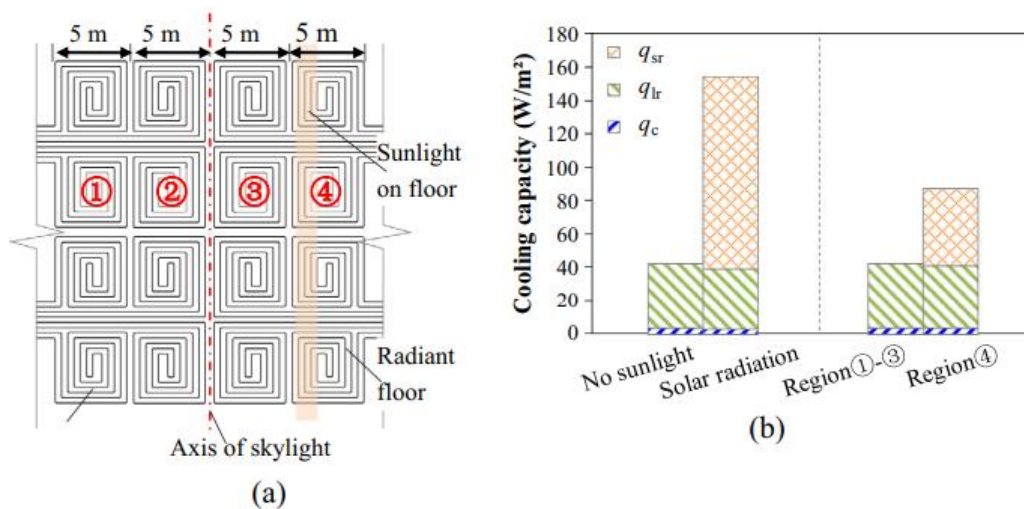


Fig.4. Impacto de la radiación solar en la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante: (a) plano cenital del suelo refrescante; y (b) capacidad de enfriamiento con/sin radiación solar<sup>8</sup>.

### 1.1.4 Resultados experimentales en la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an

En el año 2013, se realizó un estudio en la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an, el principal objetivo del estudio era analizar el rendimiento del suelo radiante/refrescante. Sus conclusiones fueron las siguientes<sup>9</sup>:

1. La capacidad de enfriamiento típica del suelo refrescante es de 30–40  $W/m^2$  con una temperatura media del agua de 18 °C; cuando hay radiación solar de alta intensidad (por ejemplo, 120-170  $W/m^2$ ), los valores aumentan significativamente a 110-140  $W/m^2$ .
2. El sistema de climatización por suelo refrescante proporciona un entorno térmico confortable para los ocupantes. En contraste con el sistema de climatización convencional de la Terminal 2.
3. El efecto de la radiación solar sobre el suelo refréscate es un proceso transitorio. Por ejemplo, en la sala de salidas del aeropuerto de Xi'an, hay dos bandas de vidrio transparentes en la fachada a una altura de 1,5 m y 2,0 m, respectivamente. La duración de la luz solar que atraviesa el vidrio y que incide en la superficie del suelo fue de 10 a 30 minutos,

como se muestra en la Fig. 5, teniendo un efecto importante en la capacidad de enfriamiento.

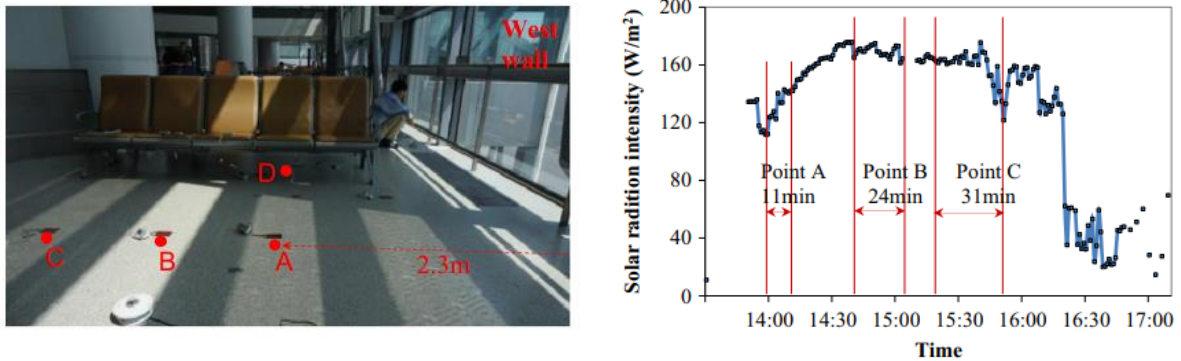


Fig. 5. Medición de la radiación solar en función del tiempo en la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an<sup>9</sup>.

En las Figs. 6 y 7 se muestra la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante teniendo en cuenta la contribución de cada uno de los modos de transferencia mencionados en los apartados anteriores.

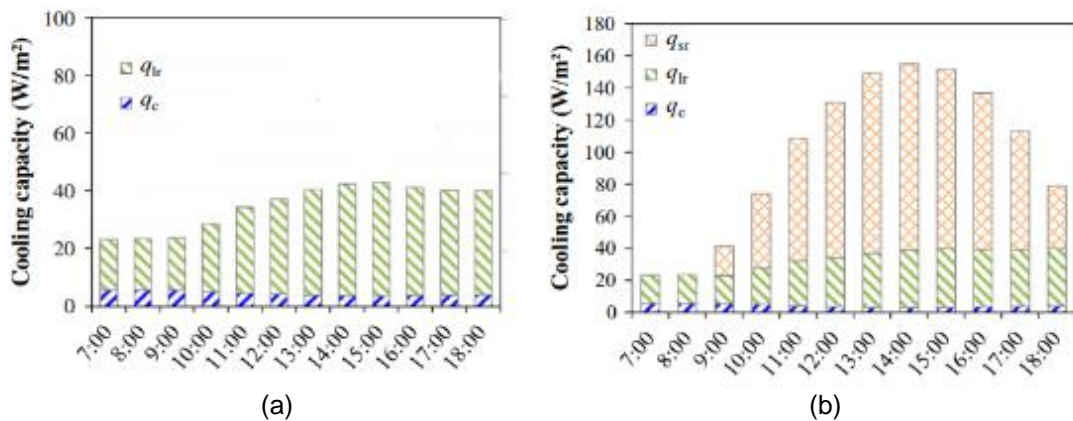


Fig. 6. Capacidad de enfriamiento del suelo refrescante: (a) en sombra; y (b) con luz solar<sup>8</sup>.

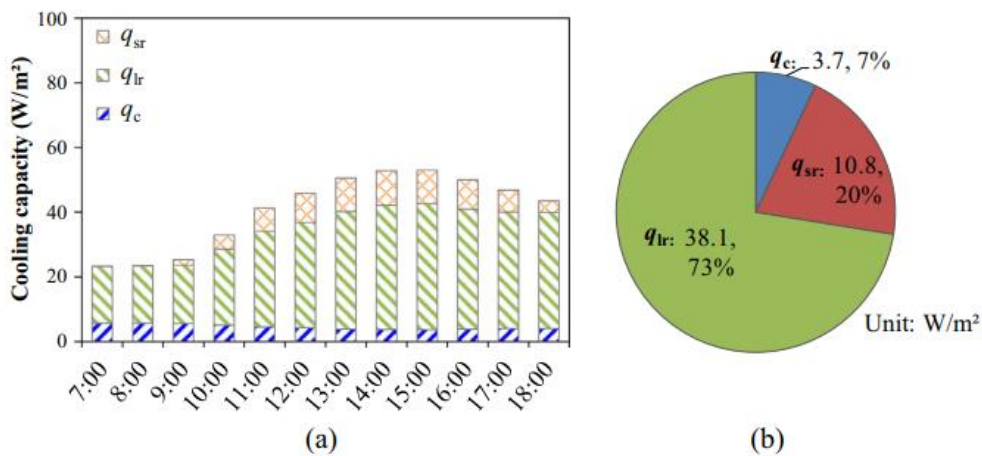


Fig. 7. Capacidad de enfriamiento media del suelo refrescante<sup>8</sup>

Una de las conclusiones más evidentes es que la transferencia de calor por convección supone un porcentaje muy pequeño de la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante, tanto si incide luz solar directamente como si no. Además, se puede apreciar la gran diferencia de rendimiento del suelo refrescante en función de la radiación solar que incide sobre el mismo.

## 1.2 Confort térmico

Las altas temperaturas que alcanzan las paredes y la radiación solar que incide en el suelo pueden producir cierta merma en el confort térmico de los usuarios del edificio, para establecer unas condiciones térmicas óptimas en este tipo de edificios se tiene que tener en cuenta la temperatura del aire y la temperatura media del suelo. Según la norma ISO 7730, la temperatura operativa debe estar dentro del rango de  $24^{\circ}\text{C} \pm 1,5$  en verano<sup>10</sup>.

La asimetría en la temperatura de la superficie y/o las diferencias verticales en la temperatura del aire pueden ser causadas debido a una temperatura operativa demasiado baja, lo cual resultaría en una merma del confort térmico. Para evitarlo se recomienda que la temperatura operativa del suelo refrescante sea igual o superior a  $19^{\circ}\text{C}$ , según la norma EN 15377<sup>11</sup>.

Recientemente, se realizó un estudio en la Universidad de Tongji, China, para obtener resultados experimentales sobre el confort térmico aplicando varias configuraciones de climatización por suelo/techo radiante/refrescante en dos intervalos de tiempo, uno de 2 horas y otro de 8 horas.

El estudio concluye que las pruebas de 2 horas indicaron que diferentes configuraciones pueden conducir a diferentes respuestas de confort térmico subjetivas y fisiológicas. En comparación con otros sistemas radiantes, el enfriamiento por suelo refrescante provocó quejas de malestar más fácilmente debido a las sensaciones térmicas locales significativamente más frías y a las temperaturas locales más bajas de la piel en áreas del tren inferior del cuerpo. Además, La comparación entre las pruebas de 2 y 8 horas indicó que el tiempo de exposición prolongado empeoraría las evaluaciones de confort térmico de todo el cuerpo y la zona del pie<sup>12</sup>.

## 1.3 Eficiencia Térmica

Los sistemas HVAC instalados en grandes edificios destinan una parte importante del consumo eléctrico a los ventiladores (i.e., 30–50%), debido al gran volumen de aire que deben desplazar<sup>13</sup>.

En cambio, en caso del suelo refrescante, al proporcionar enfriamiento a la superficie del suelo con la circulación de agua fría, reduce significativamente la cantidad de aire circulante, lo que conduce a reducciones en las dimensiones de los conductos, el tamaño del ventilador y el consumo de energía. La investigación realizada en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en California, sugiere que con este sistema se utilizó menos del 5% de la energía de los ventiladores que de otro modo sería necesaria para eliminar una determinada cantidad de calor sensible del interior; en promedio, podría ahorrar hasta un 30% de la energía en ese tipo de climas<sup>14,15</sup>.

Pese a ello en climas húmedos es necesario complementar el sistema de refrigeración del suelo refrescante con un sistema de ventilación externa que introduzca aire seco al interior, como muestra la Fig. 8.

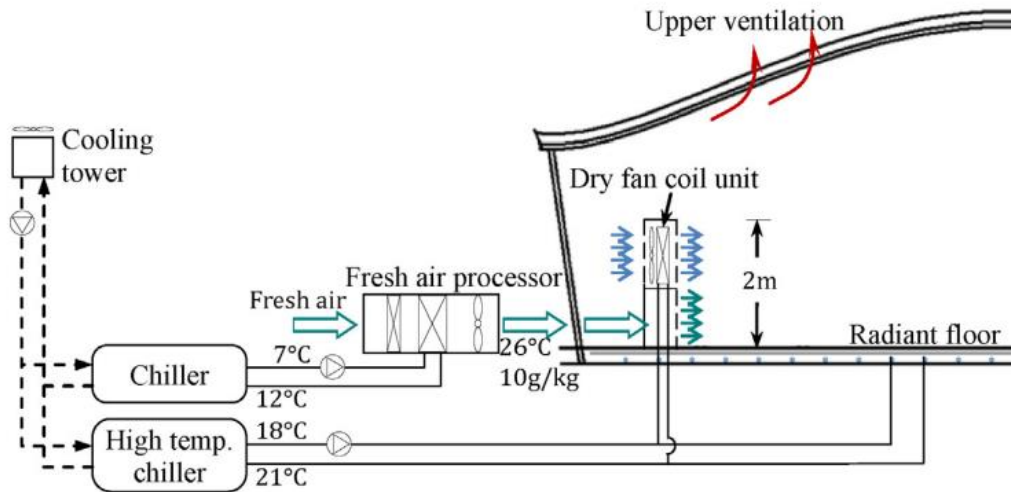


Fig. 8. Esquema del suelo refrescante combinado con un sistema de ventilación<sup>5</sup>.

### 1.3.1 Análisis del estudio realizado en la estación de tren de Tianjin

En septiembre del 2010, se realizó un estudio sobre la capacidad y el rendimiento del suelo refrescante que se había instalado en la estación. Uno de los aspectos que aborda el estudio es la diferencia entre la eficiencia energética de un sistema mixto como el que se representa en la Fig. 8 y la de un sistema HVAC convencional<sup>5</sup>.

El estudio llega a las siguientes conclusiones:

- Cuando la temperatura del aire interior se mantiene en 26 °C, la capacidad de enfriamiento proporcionada por el sistema de suelo refrescante es un 19% mayor que la del sistema HVAC. La cantidad de enfriamiento requerida para mantener el mismo ambiente interior por el sistema de suelo refrescante y el sistema HVAC se muestra en la Fig. 9a.
- Los resultados de las demandas totales de energía en el sistema del suelo refrescante y el sistema HVAC se muestran en la Fig. 9b. En ellos se puede ver que la energía utilizada por el suelo refrescante es entre un 21% y un 32% menor que la del sistema HVAC.

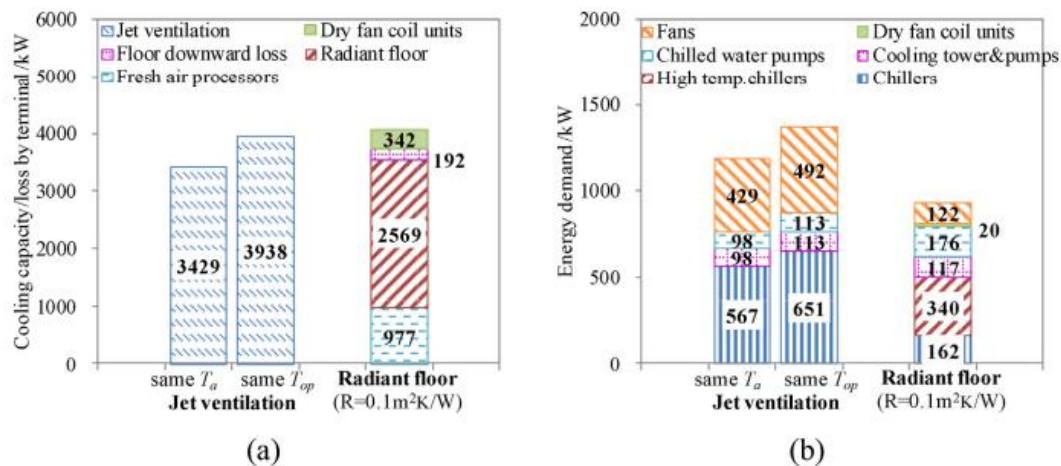


Fig. 9. Comparación del rendimiento y la demanda de energía entre el suelo refrescante y un sistema HVAC.<sup>5</sup>

## 1.4 Aplicaciones prácticas del suelo refrescante

### 1.4.1 Aplicaciones en climas moderados

El suelo radiante utilizado con fines de refrigeración surgió por primera vez en Europa, donde el clima exterior es bastante seco durante la estación veraniega. Algunos ejemplos donde se ha instalado son: la Ópera de Copenhague, el Ayuntamiento de Viborg, el BMW World de Múnich y el aeropuerto de Berlín-Brandemburgo. Las condiciones exteriores en verano son relativamente frescas y secas, por lo que no se requieren dispositivos especiales de deshumidificación; el suelo radiante se utiliza principalmente para eliminar la ganancia de calor solar con agua en circulación entre 15 y 18 °C<sup>1</sup>.

### 1.4.2 Aplicaciones en climas cálidos y húmedos

El aeropuerto de Bangkok en Tailandia ha sido el proyecto a gran escala más importante en el que se ha instalado un sistema de refrigeración por suelo refrescante en un clima cálido y húmedo. En la última década, la refrigeración por suelo refrescante ha comenzado a gozar de una popularidad cada vez mayor. Por ejemplo, se han empleado sistemas de refrigeración por suelo refrescante en el aeropuerto de Fukuoka, el aeropuerto internacional de Kansai en Japón, en la estación de tren de Tianjin y el aeropuerto de Xi'an en China entre otros<sup>16</sup>.

#### 1.4.2.1 Aeropuerto de Bangkok

En Bangkok, el clima exterior local es extremadamente cálido y húmedo, y el valor máximo de la intensidad de la radiación solar alcanza los 1100 W/m<sup>2</sup>. Los modelos de simulación que se realizaron para construcción del nuevo aeropuerto mostraron que las temperaturas de la superficie interior del techo y las paredes



podían llegar a alcanzar los 50 °C y 35 °C, respectivamente<sup>17</sup>. Los diseños del suelo refrescante y la ventilación se muestran en la Fig.10, que incluye:

-Suelo refrescante: Ocupa aproximadamente el 60% de la superficie del suelo, los tubos de agua se instalan a intervalos de 150 mm, con una temperatura interior del agua de 13 a 19 °C (intercambiando el calor con agua enfriada a una temperatura de 5 a 14 °C en una estación de refrigeración). La capacidad de enfriamiento diseñada del suelo refrescante es de 83 W/m<sup>2</sup> con una temperatura de la superficie del suelo de 23 °C, elimina aproximadamente el 55% de la carga del calor del interior.

-Ventilación: En primer lugar, el aire exterior se enfría y se deshumidifica a aproximadamente 16 °C y 7,8 g/kg respectivamente en la OAU (Unidad de Aire Exterior, del inglés, Outside Air Unit), luego se mezcla con el aire del interior en la AHU (Unidad de tratamiento de aire, del inglés, Air Handling Unit). El aire que se suministra nuevamente al interior por la ventilación es de aproximadamente 18 °C y 10 g/kg con un caudal de aire de 4 ACH (Renovaciones de aire por hora, del inglés, Air Changes per Hour).

Evitar la condensación de agua en la superficie del suelo es una condición previa para el normal funcionamiento del sistema de refrigeración por suelo refrescante durante las estaciones húmedas. Por lo tanto, las AHU se encienden con anticipación para disminuir la proporción de humedad en el interior. Solo si la temperatura de rocío se reduce hasta cierto punto, se encienden las válvulas de agua del suelo refrescante. Al mismo tiempo, se han instalado varios sensores de temperatura en la superficie del suelo refrescante para garantizar que la temperatura más baja de la superficie sea más alta que la temperatura de rocío en el interior.

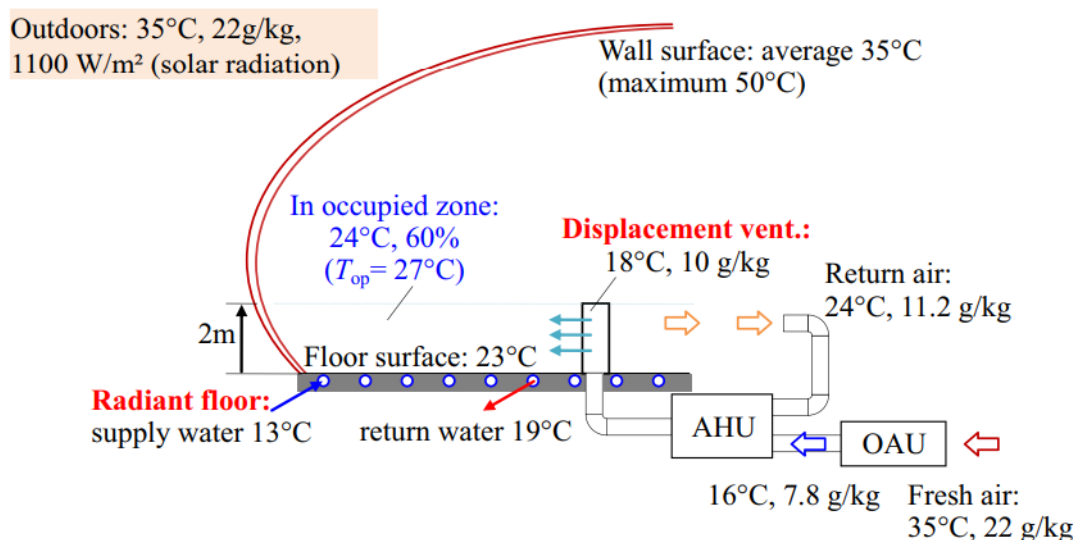


Fig. 10. Esquema del sistema de refrigeración por suelo refrescante del aeropuerto de Bangkok<sup>1</sup>.

#### 1.4.2.2 Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an

En la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an ha aplicado un sistema semejante al mencionado anteriormente. El aire circulante es solo aire exterior que se

introduce en un dispositivo desecante líquido (que se muestra en la Fig. 11), por lo que la tasa de flujo es menor que la del aeropuerto de Bangkok. Según las mediciones de campo realizadas el 16 de julio de 2013, cuando la temperatura exterior, el índice de humedad y la intensidad de la radiación solar eran de 33 a 35 °C, de 16 a 17 g / kg y de 300 a 750  $W/m^2$ , respectivamente, la temperatura del aire interior y la humedad relativa fueron de 23,4–24,3 °C y del 60%, respectivamente, ambos dentro del rango confortable. Cuando no había radiación solar directa, la temperatura de la superficie del suelo refrescante era de aproximadamente 22,4 °C con una temperatura media del agua enfriada de 17,3 °C, y la capacidad de refrigeración correspondiente era de 35 a 40  $W/m^2$ . Una vez expuesto a la luz solar con una intensidad de 160 a 175  $W/m^2$ , la capacidad de enfriamiento del suelo refrescante aumentó bruscamente a 130-140  $W/m^2$ .<sup>1</sup>

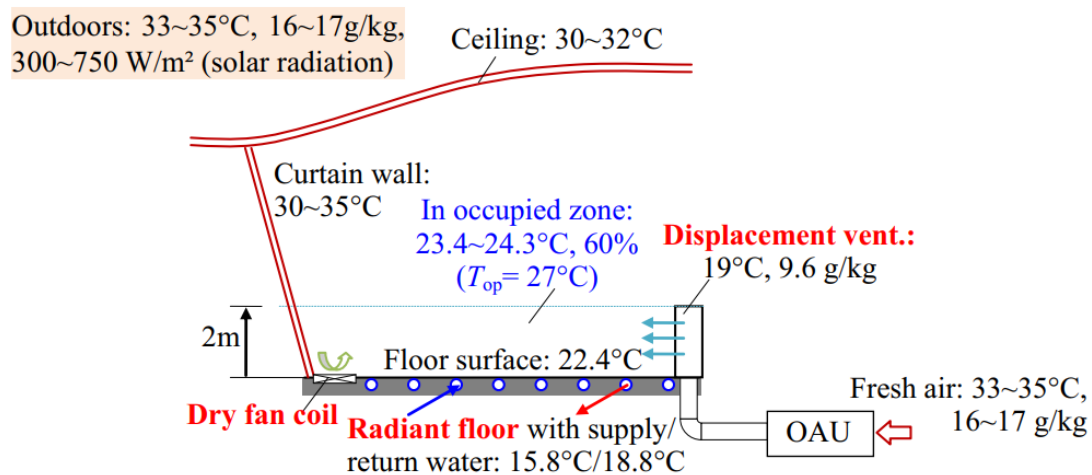


Fig. 11. Esquema del sistema de refrigeración por suelo refrescante de la Terminal 3 del aeropuerto de Xi'an <sup>1</sup>.

## 1.5 Consideraciones e inconvenientes en las aplicaciones prácticas

### 1.5.1 Acumuladores térmicos sobre la superficie

En los suelos refrescantes, las tuberías de agua están revestidas con un núcleo de hormigón y encima se coloca un revestimiento que puede ser de distinto tipo (mármol, baldosas, suelo de parqué, etc.). Por lo tanto, esta losa de hormigón y la capa superficial están incluidas en el mecanismo de transferencia de calor y actúan como acumuladores de calor. Según algunos análisis experimentales realizados, el suelo refrescante puede tardar varias horas en alcanzar su estado estable<sup>18</sup>. El suelo refrescante es generalmente demasiado lento para reaccionar a cambios rápidos en la carga de enfriamiento, como un aumento brusco en el número de ocupantes de interiores. Los sistemas HVAC tienen tiempos de respuesta más rápidos que los suelos refrescantes. Por lo tanto, estos dispositivos convencionales pueden usarse para abordar fluctuaciones locales o específicas de zona en la carga de enfriamiento más allá de la carga base administrada por el suelo refrescante.

### **1.5.2 Capacidad de enfriamiento muy variable**

Además de los niveles de temperatura de los fluidos refrigerantes, la capacidad de refrigeración del suelo radiante está estrechamente relacionada con las condiciones térmicas interiores (es decir, temperatura del aire, temperatura de la pared y radiación solar). Si la radiación solar directa llega a la superficie del suelo refrescante, será absorbida por el suelo y transferida al fluido refrigerante, aumentando así la capacidad de refrigeración del suelo refrescante. La temperatura de la superficie de la pared tiene el mismo impacto en el rendimiento del suelo refrescante.

Además, el calor transferido y eliminado por el agua enfriada es distinto del calor absorbido en la superficie del suelo. La mayor parte del calor de la radiación solar absorbida se almacena en el suelo refrescante y se libera después de varias horas, por lo que los cambios en la extracción de calor por el agua enfriada son pequeños. Esta característica térmica de los sistemas de núcleo de hormigón permite disminuir la carga de enfriamiento máxima de la planta de refrigeración<sup>19</sup>.

### **1.5.3 Influencia del aire infiltrado del exterior**

Dado que la infiltración de aire es inevitable en edificios con las características de una terminal aeroportuaria, se debe tener en cuenta la ubicación de las puertas exteriores para minimizar la infiltración de aire caliente y húmedo proveniente del exterior, especialmente en regiones húmedas. Una temperatura exterior o una relación de humedad más altas dan lugar a una menor densidad del aire. La infiltración de aire caliente y húmedo exterior se acumula en la parte superior del espacio interior<sup>20</sup>.

Por lo tanto, la influencia de la infiltración caliente y húmeda es solo cerca de las entradas, sin ningún impacto en la región interior. Para los edificios que adoptan suelos refrescantes, estos deben instalarse a cierta distancia de las puertas exteriores. Por ejemplo, en el aeropuerto de Bangkok, el aeropuerto de Xi'an y en el atrio de un edificio de oficinas en Shenzhen en China, las primeras áreas refrigeradas se instalaron a una distancia de 5 a 10 m de las entradas. Según los resultados experimentales, no hubo condensación en la superficie del suelo refrescante a una temperatura de 21 °C cuando la temperatura del aire exterior, el índice de humedad y la temperatura del punto de rocío eran de 30-32 °C, 18-19 g/kg y 23,8 °C, respectivamente<sup>21</sup>.

### **1.5.4 Obstáculos sobre la superficie**

Los efectos de la radiación solar y la temperatura sobre la superficie de los suelos refrescantes que estén sombreados por muebles (como sillas) serán bastante diferentes de los de los suelos refrescantes sin sombra. Por ejemplo, en una terminal aeroportuaria o en una estación de tren, generalmente hay muchos bancos en las salas de espera, como se muestra en la Fig. 12. Debido a la presencia de estos bancos, el suelo refrescante debajo de los bancos no se ve afectado por la radiación solar o las superficies internas de las paredes a alta temperatura, por lo que su temperatura superficial será menor. Por lo tanto, se debe prestar más atención a la temperatura de la superficie de los suelos refrescantes a la sombra para minimizar el riesgo de condensación<sup>5</sup>.



Fig. 12. Sala de espera de una terminal<sup>5</sup>.

## Capítulo 2. Optimización del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores

Tal y como se ha mencionado anteriormente la transferencia de calor por convección en el caso del suelo refrescante es prácticamente marginal, supone menos del 10% del total. El principal objetivo de este trabajo es mejorar la transferencia de calor por convección.

La idea es simple, con la instalación de ventiladores se induce un flujo de aire vertical. Este desplaza y renueva el aire que está en contacto directamente con la superficie del suelo. Esto produce un aumento en la diferencia entre la temperatura del suelo y del aire y, en consecuencia, un aumento en la transferencia de calor por convección.

### 2.1 Mediciones experimentales de la capacidad de enfriamiento mediante el uso de ventiladores

A mediados de 2017, en la Universidad de Berkeley, California, se realizó un estudio para determinar de forma experimental el rendimiento del suelo refrescante bajo dos configuraciones distintas. Una de ellas consistía en la instalación de ventiladores de techo y otra, en la instalación de una moqueta que cubriera toda la superficie del suelo.

Los resultados (Fig. 13a) mostraron que el uso de ventiladores de techo puede aumentar la capacidad de enfriamiento del suelo radiante en aproximadamente un 16%, de  $32,4 \text{ W/m}^2$  a  $37,6 \text{ W/m}^2$  con una temperatura operativa de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . La capacidad de enfriamiento del suelo refrescante puede aumentar hasta  $41 \text{ W/m}^2$ , lo que supone un 26% aproximadamente, con una temperatura operativa de  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig. 13c). En ambos casos, la capacidad de refrigeración del suelo radiante aumentó debido al aumento del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Al comparar las temperaturas de la superficie (Fig.13d), con una temperatura operativa de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ , se comprobó que la temperatura de la superficie solo aumentó algo menos de  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  al encenderse los ventiladores de techo, con una temperatura del agua de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura ambiente del aire en la cámara en ambos casos fue de  $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que sugiere que la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del suelo fue de aproximadamente  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cuando se aumentó la temperatura operativa a  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ , la temperatura de la superficie del suelo se incrementó en  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  mientras se mantenía la misma diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y el aire. Es importante destacar que estas mediciones se realizaron con todas las ventanas cerradas para evitar la incidencia de la radiación solar.

La Fig. 13b muestra que la capacidad de enfriamiento del suelo radiante se reduce un 5% aproximadamente con la instalación de la moqueta. Todas las temperaturas superficiales presentadas en las Fig. 13d, 13e y 13f se refieren a la superficie del suelo de hormigón y las temperaturas se obtuvieron para la misma temperatura de suministro de agua. Las diferencias que se pueden observar son causadas por cambios en la temperatura ambiente ( $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$  para

$T_{op} = 24 \text{ °C}$  y  $26.5$  para  $T_{op} = 26 \text{ °C}$ ) y la resistencia térmica de la moqueta. Los resultados sugieren que la resistencia térmica creada por la moqueta hace que la temperatura de la superficie del suelo (superficie inmediatamente por debajo de la moqueta) sea más baja que en otros casos examinados en este estudio<sup>14</sup>.

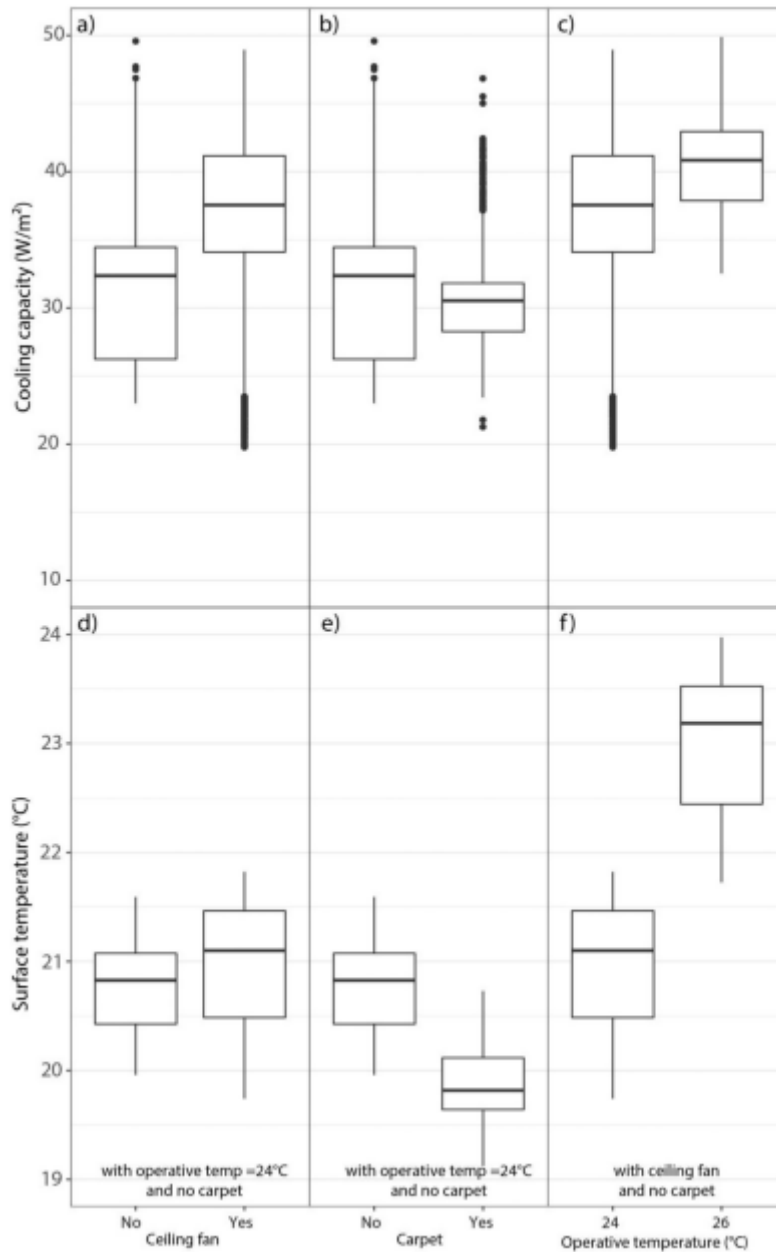


Fig. 13. Capacidad de enfriamiento y temperatura de la superficie para las distintas configuraciones<sup>14</sup>.

### 2.1.1 Limitaciones del estudio

El estudio se realizó en una sala de 6,4 x 9,6 x 2,5 m, por lo tanto, hay una gran diferencia con las dimensiones típicas de una terminal aeroportuaria. La sala tenía solo una ventana orientada al sur lo que resultó en una pequeña exposición solar directa del suelo.

## **2.2 Simulaciones realizadas con SolidWorks**

Para analizar el rendimiento y el comportamiento del suelo refrescante optimizado por ventiladores se ha recurrido al programa SolidWorks, que entre muchas otras funciones permite realizar simulaciones de flujo y obtener parámetros como la temperatura, velocidad, presión, etc. Otro aspecto destacable es que SolidWorks permite realizar estas simulaciones para múltiples configuraciones distintas, lo cual se adapta perfectamente al estudio que se pretende realizar.

### **2.2.1 Limitaciones y simplificaciones aplicadas a la simulación**

Tal y como se ha mencionado anteriormente y aparece en el propio título, el objetivo de este estudio es la optimización del suelo refrescante mediante el uso de ventiladores aplicado a una terminal aeroportuaria, sin embargo, la primera limitación a la hora de realizar las simulaciones es precisamente el gran tamaño y complejidad de una terminal, realizar una sola simulación requeriría una enorme potencia de cálculo. Por lo tanto, se debe elegir una superficie más pequeña que represente lo más fielmente posible las condiciones de una terminal. Un factor muy importante son las condiciones de contorno de la simulación. En la Fig. 15a se muestra la velocidad del flujo generada por un ventilador en un volumen totalmente cerrado, y en la Fig. 15b se muestra lo mismo que en el caso anterior, pero con un volumen abierto por los costados y la parte superior. Si se comparan ambas figuras se puede extraer una conclusión clara, las paredes contribuyen de forma importante al incremento del flujo convectivo.

Debido al diseño de la mayoría de terminales, la mayor parte de la superficie del suelo está bastante alejada de las paredes y del techo, por lo tanto, su impacto en el coeficiente convectivo de la mayor parte de la terminal será despreciable.

Por otro lado, se ha optado por excluir de la simulación todas las fuentes de calor que no tiene una incidencia importante en la transferencia de calor por convección, como puede ser la incidencia de la luz solar (radiación de onda corta) o la emisión de calor que producen las paredes, el techo, la iluminación artificial (radiación de onda larga), debido fundamentalmente a que la instalación de ventiladores solo contribuirá a la mayor transferencia de calor por convección pero no influirá en el resto.

Debido a esta simplificación la simulación se realizará con una única fuente de frío distribuida uniformemente por toda la superficie. Este hecho propicia que, la simulación no sea estacionaria porque a medida que pasa el tiempo el fluido en contacto con esta superficie se va enfriando hasta llegar al cero absoluto debido a que no tiene ningún aporte de calor. Para remediar esta situación todas las simulaciones estarán limitadas a una duración de treinta minutos.

Otro parámetro a tener en cuenta es el tamaño de la malla y el número de nodos que tiene a la hora de realizar la simulación. SolidWorks resuelve las simulaciones utilizando métodos numéricos, para poder aplicarlos es necesario discretizar el problema. Es en este punto cuando SolidWorks crea una malla de puntos, en los que posteriormente resolverá la simulación, por lo tanto, cuanta mayor cantidad de puntos, mayor será la precisión de los resultados, pero

también aumentará el tiempo de simulación. En la Fig. 14 se puede apreciar la malla de puntos construida sobre el ventilador.

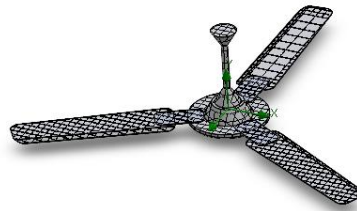


Fig. 14. Malla de puntos sobre un ventilador.  
Fuente: Elaboración propia.

Por último, todos los sólidos se han considerado adiabáticos por lo tanto no hay intercambio de calor entre el fluido y los sólidos con los que interacciona.

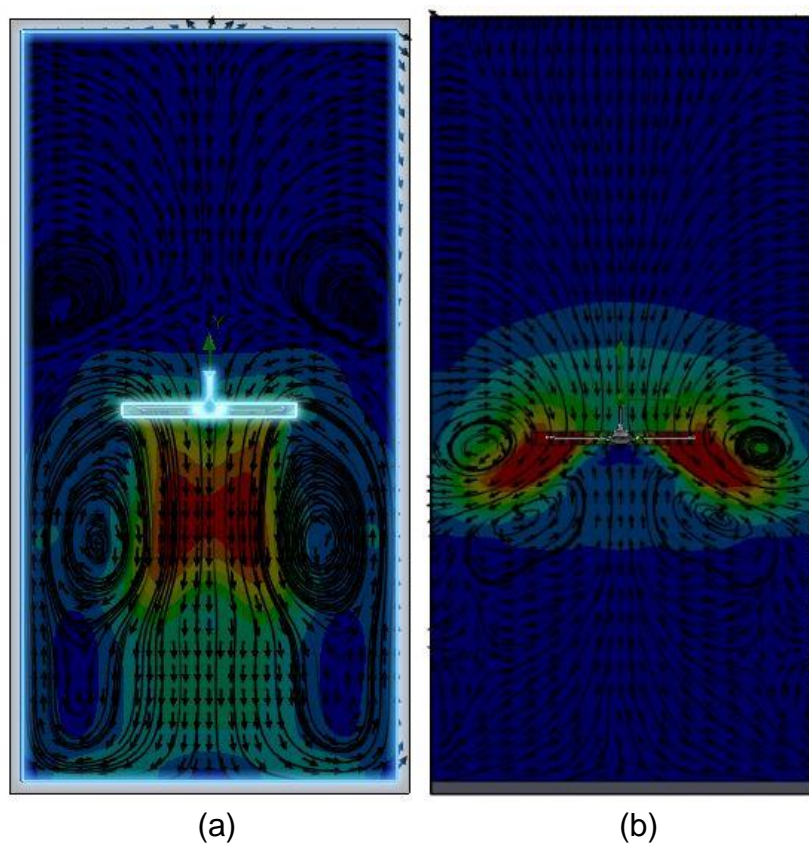


Fig. 15. Velocidad del flujo generada por un ventilador: (a) en un volumen cerrado y (b) en un volumen abierto. Fuente: Elaboración propia.



## 2.2.2 Características y condiciones iniciales comunes en todas las simulaciones

Para que los resultados de las distintas simulaciones sean comparables entre si se han fijado las siguientes condiciones iniciales:

- $T = 298\text{ K}$
- $P = 101325\text{ Pa}$
- $g = -9.81\text{ m/s}^2$
- Fluido: Aire
- Tiempo físico de simulación: 1800 s
- Superficie del suelo:  $10\text{ m}^2$
- Velocidad angular: 300 RPM
- Capacidad de enfriamiento:  $100\text{ W/m}^2$
- Dominio de la simulación:  $10 \times 10 \times 4\text{ m}$

## 2.2.3 Configuración de la simulación

Para poder determinar cuál es la mejor forma de optimizar el suelo refrescante mediante el uso ventiladores, se realizarán simulaciones con distintas configuraciones, se modificará el número de ventiladores, su disposición, su velocidad angular y la capacidad de enfriamiento del suelo. Una vez obtenidos los resultados se compararán básicamente tres parámetros: la temperatura media a una altura de 0,6 m, la temperatura media a 1,1 m y la diferencia entre ambas temperaturas. Este último parámetro es importante especialmente a la hora de determinar el confort térmico.

Todos los mapas de temperatura que se mostrarán a continuación están sujetos a la misma escala:

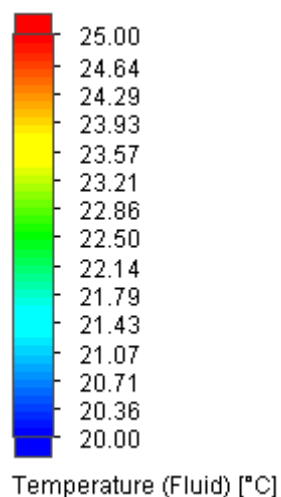


Fig. 16. Escala de temperaturas.

### 2.3 Simulaciones con los ventiladores instalados en el techo

En esta configuración se instalarán cinco ventiladores en un techo ficticio a una altura de tres metros sobre la superficie del suelo tal y como se muestra en la Fig. 17.

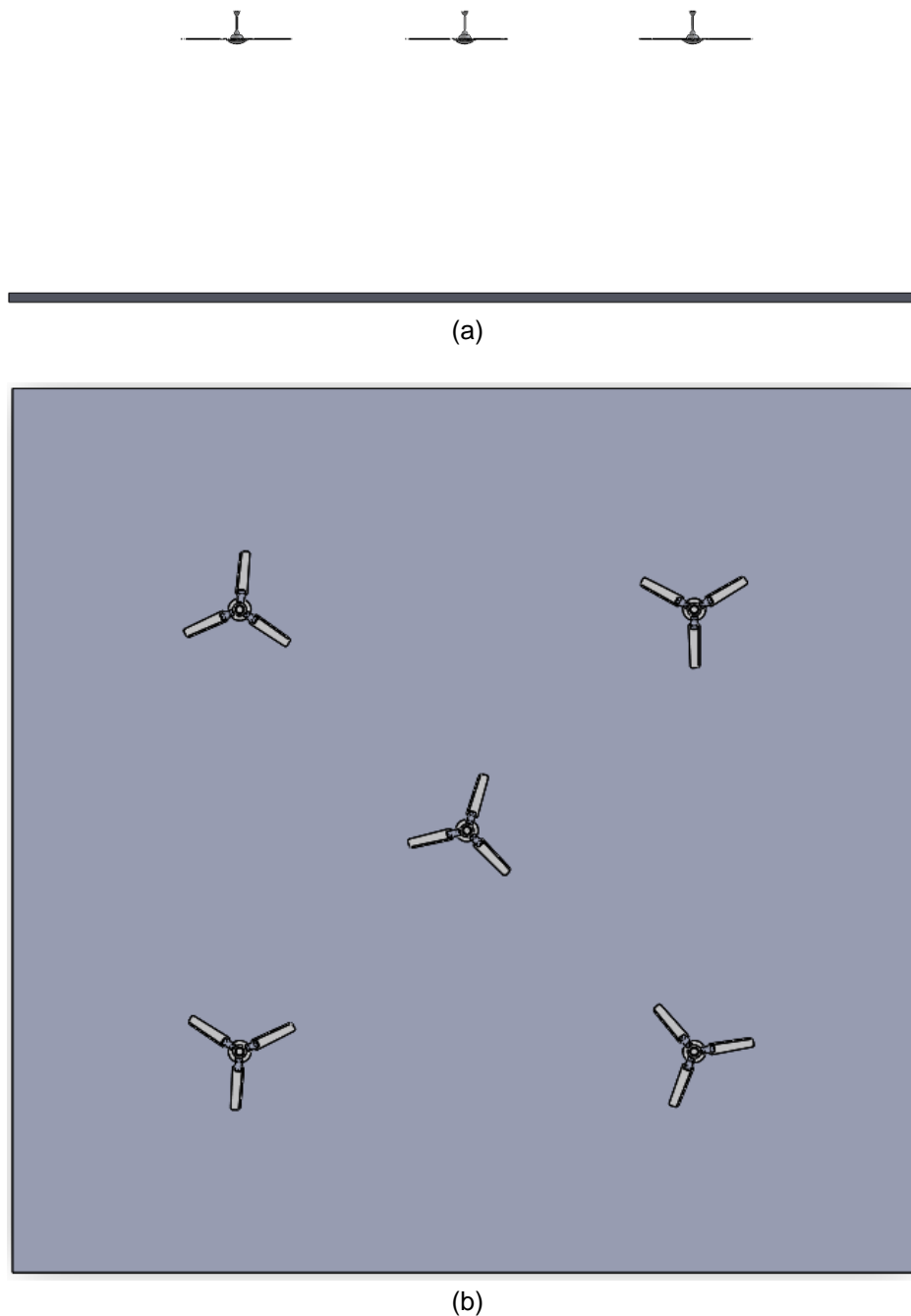


Fig. 17. Vistas de la configuración con los ventiladores instalados en el techo: (a) alzado y (b) planta

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.1 Rotación horaria vs antihoraria

En la Fig. 18 se muestra la temperatura del aire cuando la rotación es en sentido antihorario (flujo descendente), en la Fig. 19 se muestra el caso contrario y en la Tabla 1 se muestra la comparación de resultados.

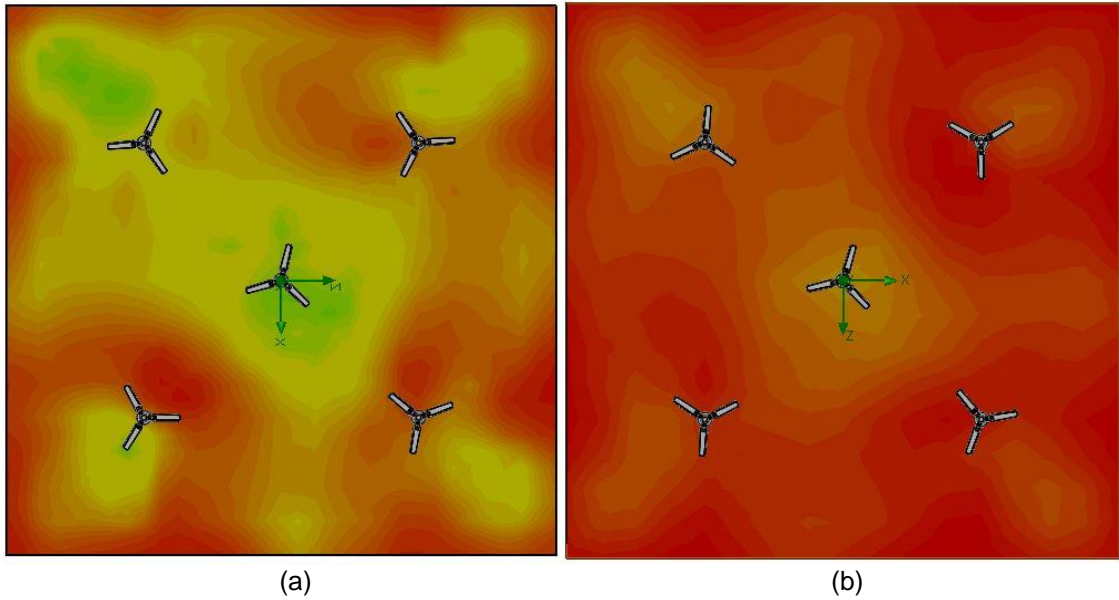


Fig. 18. Mapa de temperatura con un flujo descendente: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m.  
Fuente: Elaboración propia

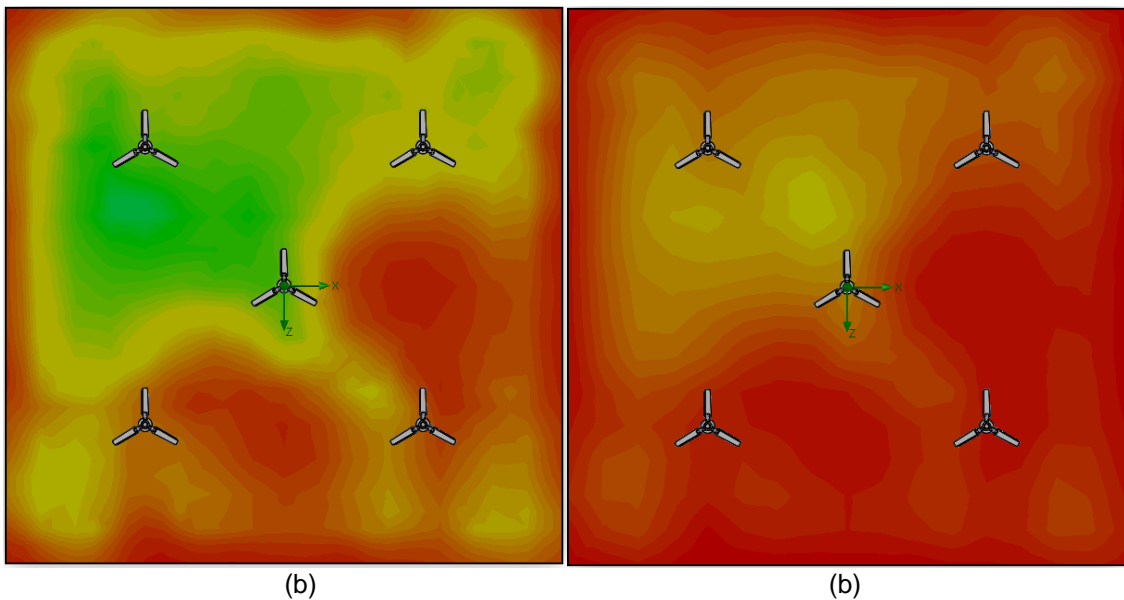


Fig. 19. Mapa de temperatura con un flujo ascendente: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m.  
Fuente: Elaboración propia

	Flujo Descendente	Flujo Ascendente
1.1 m	24,94 °C	24,92 °C
0.6 m	23,14 °C	22,92 °C
Diferencia	1,8 °C	2 °C

Tabla 1. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1 $100 W/m^2$ vs $200 W/m^2$

En la Fig. 20 se muestra la temperatura del aire cuando la capacidad de enfriamiento es de  $200 W/m^2$ . Para obtener los resultados de la Tabla 2 los ventiladores han girado en sentido antihorario (flujo descendente).

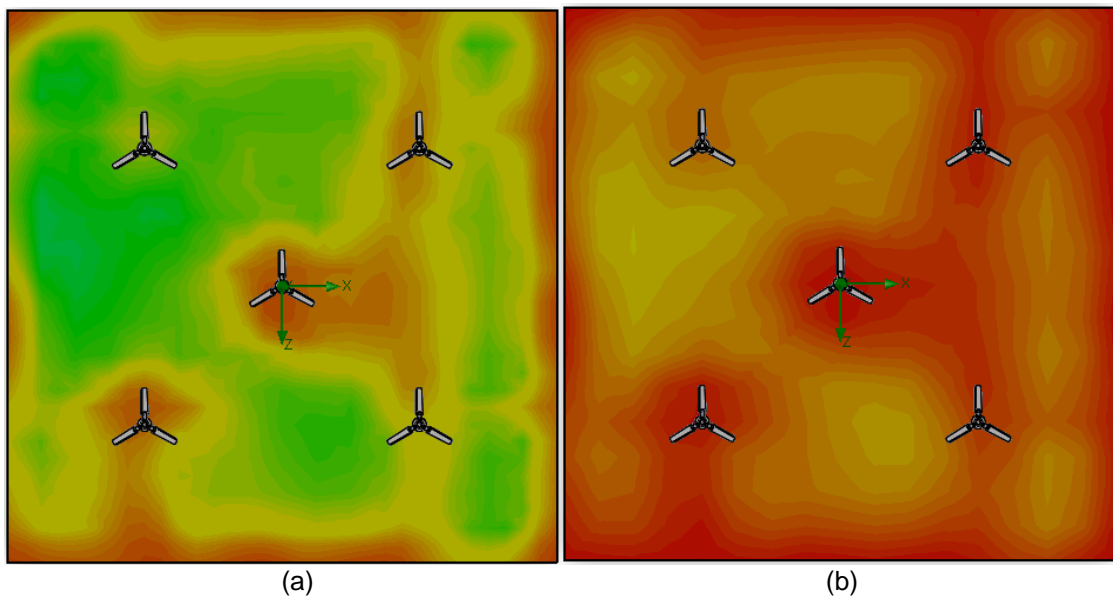


Fig. 20. Mapa de temperatura con una capacidad de enfriamiento de  $200 W/m^2$ : (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m. Fuente: Elaboración propia

	$100 W/m^2$	$200 W/m^2$
1.1 m	24,92 °C	24,84 °C
0.6 m	22,92 °C	22,26 °C
Diferencia	2 °C	2,58 °C

Tabla 2. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.3 300 RPM vs 600 RPM

En la Fig. 21 se muestra la temperatura del aire cuando la velocidad angular de los ventiladores es de 600 RPM. Para obtener los resultados de la Tabla 3 los ventiladores han girado en sentido antihorario (flujo descendente).

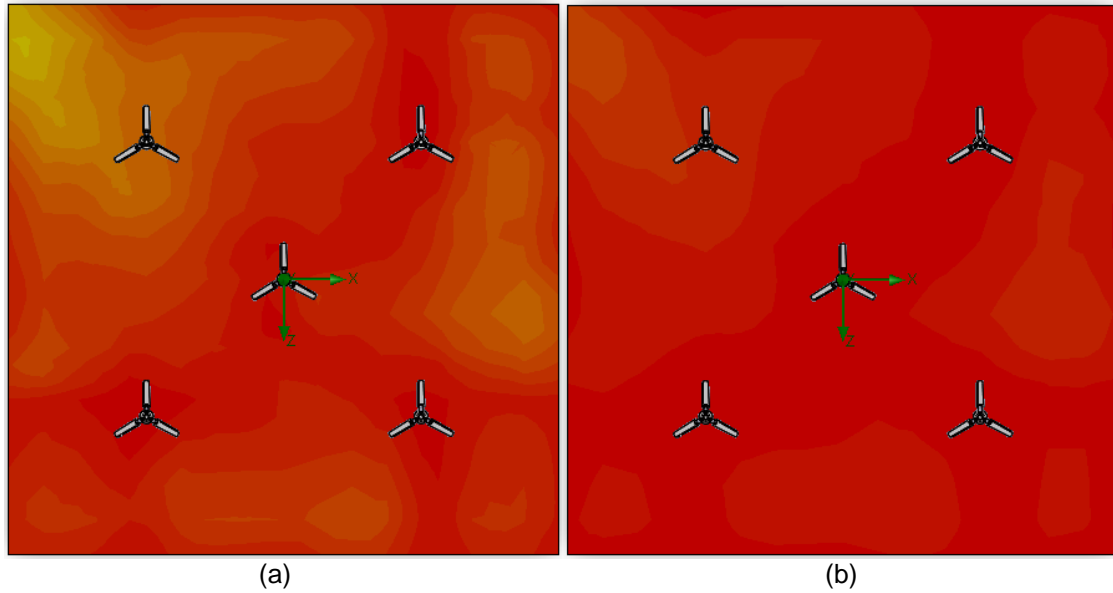


Fig. 21. Mapa de temperatura con una velocidad angular de 200 RPM: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m. Fuente: Elaboración propia

	300 RPM	600 RPM
1.1 m	24,92 °C	24,96 °C
0.6 m	22,92 °C	24,54 °C
Diferencia	2 °C	0,42 °C

Tabla 3. Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Ventiladores instalados en el suelo

Otra configuración bastante interesante es la instalación de ventiladores en el suelo, con las mismas condiciones que los casos anteriores, tal y como se muestra en la Fig. 22.

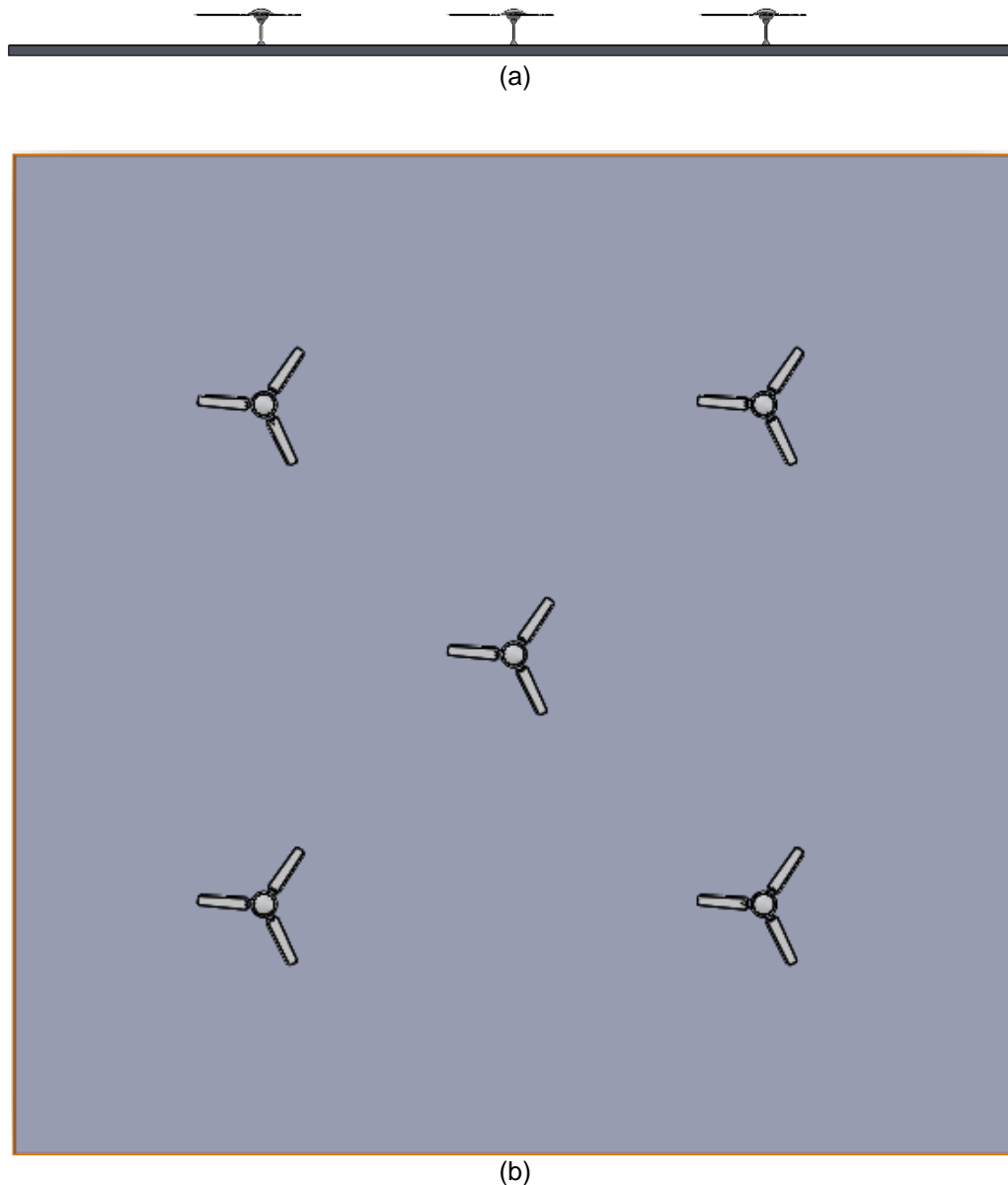


Fig. 22. Vistas de la configuración con los ventiladores instalados en el techo: (a) alzado y (b) planta

Fuente: Elaboración propia

### 2.4.1 Rotación horaria vs antihoraria

En la Fig. 23 se muestra la temperatura del aire cuando la rotación es en sentido antihorario (flujo descendente), en la Fig. 24 se muestra el caso contrario y en la Tabla 4 se muestra la comparación de resultados.

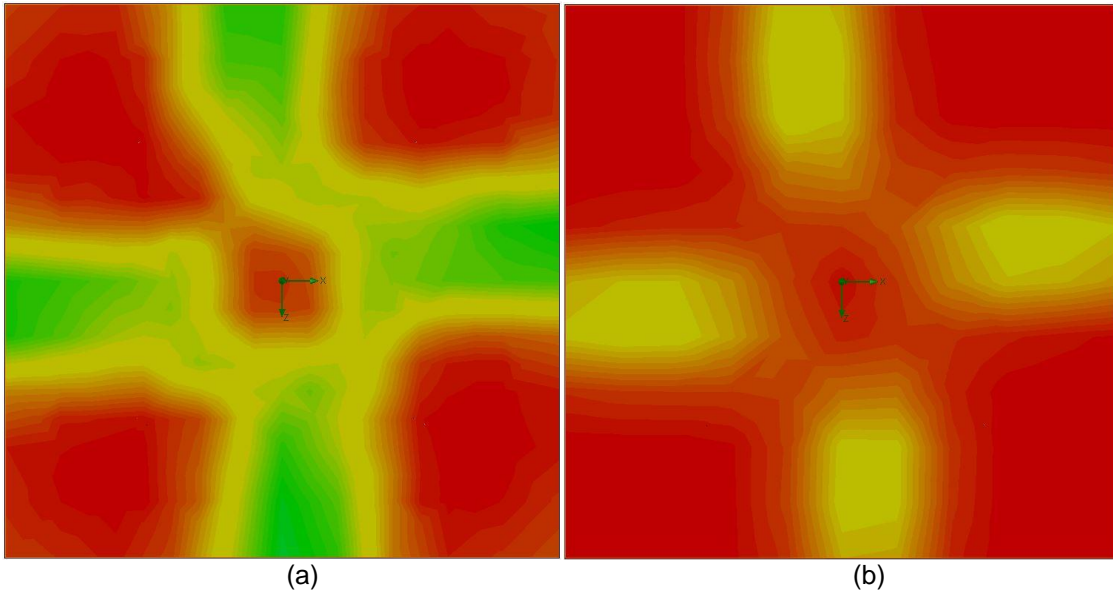


Fig. 23. Mapa de temperatura con un flujo descendente: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m.  
Fuente: Elaboración propia

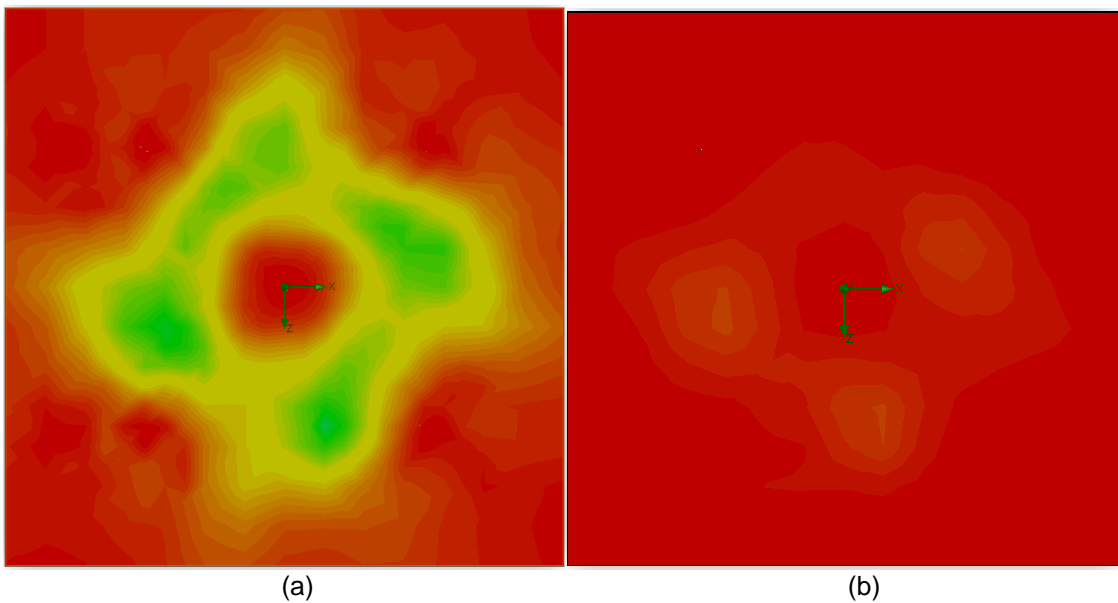


Fig. 24. Mapa de temperatura con un flujo ascendente: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m.  
Fuente: Elaboración propia

	Flujo Descendente	Flujo Ascendente
1.1 m	24,67 °C	24,90 °C
0.6 m	23,57 °C	24,02 °C
Diferencia	1,1 °C	0,88 °C

Tabla 4. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.4.2 $100 W/m^2$ vs $200 W/m^2$

En la Fig. 25 se muestra la temperatura del aire cuando la capacidad de enfriamiento es de  $200 W/m^2$ . Para obtener los resultados de la Tabla 5 los ventiladores han girado en sentido antihorario (flujo descendente).

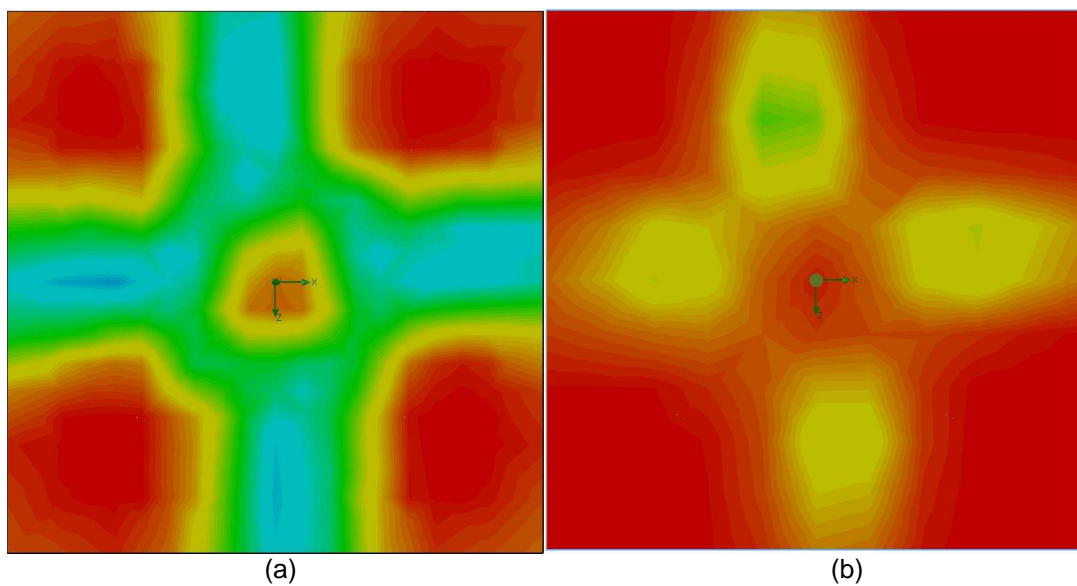


Fig. 25. Mapa de temperatura con una capacidad de enfriamiento de  $200 W/m^2$ : (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m. Fuente: Elaboración propia

	$100 W/m^2$	$200 W/m^2$
1.1 m	24,67 °C	24,48 °C
0.6 m	23,57 °C	22,71 °C
Diferencia	1,1 °C	1,77 °C

Tabla 5. Fuente: Elaboración propia.



### 2.4.3 300 RPM vs 600 RPM

En la Fig. 26 se muestra la temperatura del aire cuando la velocidad angular de los ventiladores es de 600 RPM. Para obtener los resultados de la Tabla 6 los ventiladores han girado en sentido antihorario (flujo descendente).

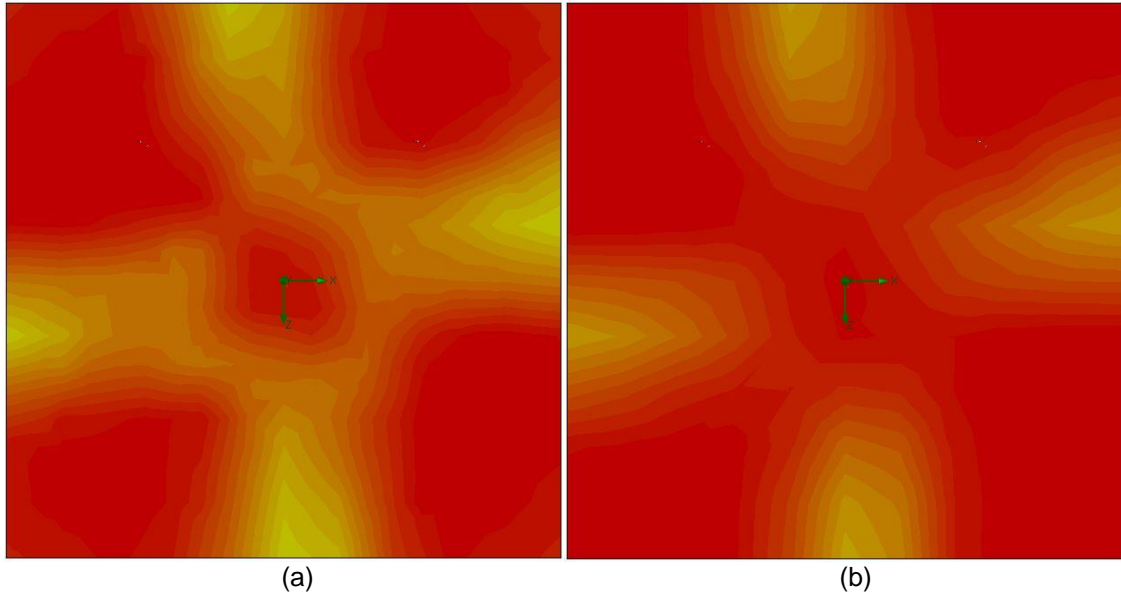


Fig. 26. Mapa de temperatura con una velocidad angular de 200 RPM: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m. Fuente: Elaboración propia

	300 RPM	600 RPM
1.1 m	24,67 °C	24,85 °C
0.6 m	23,57 °C	24,72 °C
Diferencia	1,1 °C	0,13 °C

Tabla 6. Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.4 5 Ventiladores vs 9 Ventiladores

En la Fig. 27 se muestra la temperatura del aire cuando se instalan 9 ventiladores en vez de 5. Para obtener los resultados de la Tabla 7 los ventiladores han girado en sentido antihorario (flujo descendente).

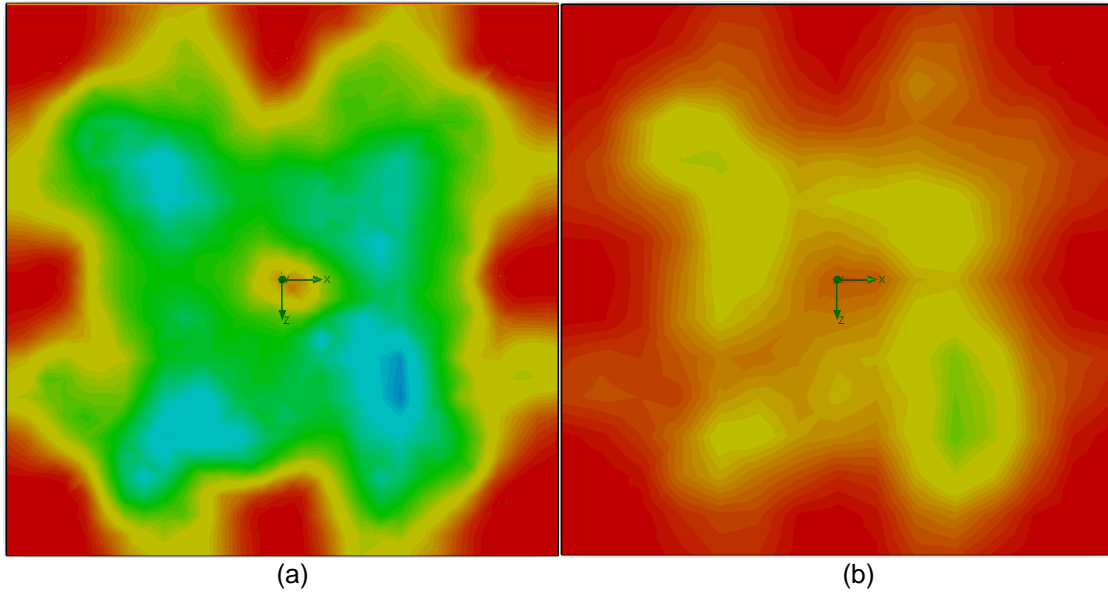


Fig. 27. Mapa de temperatura con 9 ventiladores instalados: (a) a 0.6 m y (b) a 1.1 m. Fuente: Elaboración propia

	5 ventiladores	9 ventiladores
1.1 m	24,67 °C	24,16 °C
0.6 m	23,57 °C	22,75 °C
Diferencia	1,1 °C	1,41 °C

Tabla 7. Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 3. Análisis de los resultados.

### 3.1 Consideraciones previas.

Antes de proceder con el análisis de los resultados hay que destacar algunos aspectos importantes, que pueden afectar al resultado de las simulaciones. En el apartado 2.2.1, que hace referencia a las limitaciones de la simulación, se explica porque la simulación se ha decidido realizar en un volumen abierto. Este hecho afecta de manera importante sobre todo a las simulaciones en las que los ventiladores están instalados en el techo y producen un flujo de aire descendente, de manera que por la parte superior del dominio de la simulación entra aire a 25 °C, desciende hasta el suelo y es expulsado hacia el exterior del dominio de la simulación por lo tanto no se crea la corriente convectiva que se busca. En la Fig. 28 se puede apreciar el fenómeno descrito anteriormente.

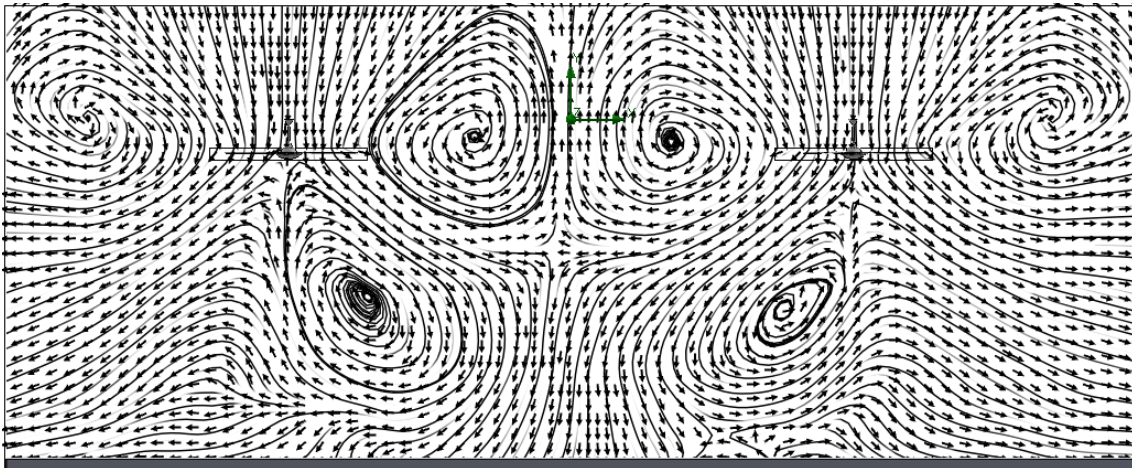


Fig. 28. Líneas de corriente y vectores de velocidad de un estudio transversal (alzado).  
Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Comparación de los resultados obtenidos con los ventiladores instalados en el techo.

Debido a lo mencionado en el apartado anterior los datos obtenidos cuando los ventiladores generan un flujo descendente, los resultados obtenidos con esta configuración están bastante alejados de la realidad debido a las simplificaciones realizadas, por lo tanto, no van a ser considerados válidos. Sin embargo, los resultados obtenidos con un flujo de aire ascendente no originan el mismo problema que en el caso anterior, por lo tanto, si se considerarán válidos.

Otro punto destacable es la heterogeneidad que se observa en los mapas de temperatura (Fig. 18 y 19). Esto sucede fundamentalmente debido a la distancia que existe entre los ventiladores y las áreas de referencia. Esta distancia propicia que el flujo cada vez se torne más turbulento originando diferencias de temperatura importantes.

Por otro lado, cuando se duplica la capacidad de enfriamiento, sí que se consiguen buenos resultados a una altura de 0,6 m (Fig. 20a), en cambio, a la altura de 1,1 m (Fig. 20b), prácticamente no tiene ninguna afectación, con el inconveniente de que aumenta la diferencia de temperaturas resultando en una merma del confort térmico.

Por último, al duplicar la velocidad la velocidad angular de los ventiladores, el aire adquiere mucha más velocidad de manera no tiene suficiente tiempo para enfriarse (Fig. 21). Pese a ello, este aumento de la velocidad angular de los ventiladores reduce las diferencias de temperatura entre distintas alturas, mejorando el confort térmico.

### 3.3 Comparación de los resultados obtenidos con los ventiladores instalados en el suelo.

Lo primero que cabe destacar es que los mapas de temperatura obtenidos con esta configuración (Fig. 23 y 24), son bastante simétricos debido fundamentalmente a que el flujo de aire es bastante menos turbulento que en la configuración anterior.

De forma bastante anti intuitiva, cuando los ventiladores se configuran para generar un flujo de aire ascendente (Fig. 24), son menos eficaces a la hora de elevar el aire que cuando se disponen en la configuración contraria (Fig. 23), esto se debe a que cuando el aire es acelerado por el ventilador, no solo adquiere una componente vertical, sino que también adquiere una componente horizontal. La componente vertical de la aceleración del aire tiende a decrecer muy rápido debido a que es más denso y pesado, y acaba desplazándose de forma prácticamente horizontal, tal y como muestra la Fig. 29.

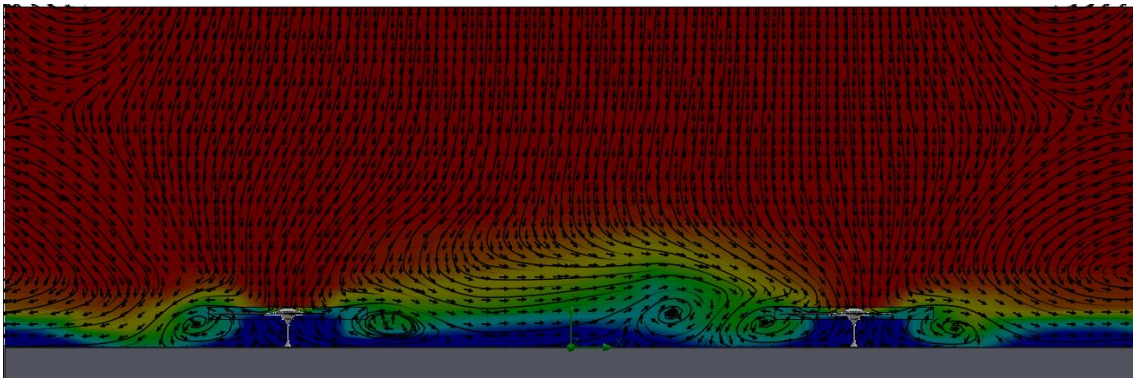


Fig. 29. Mapa de temperatura, líneas de corriente y vectores de velocidad de un estudio transversal (alzado), con un flujo ascendente.  
Fuente: Elaboración propia

En cambio, con un flujo descendente el resultado es bastante distinto, cada ventilador desplaza el aire hacia el suelo, este se enfría y se vuelve a elevar tal y como se muestra en la Fig. 30.

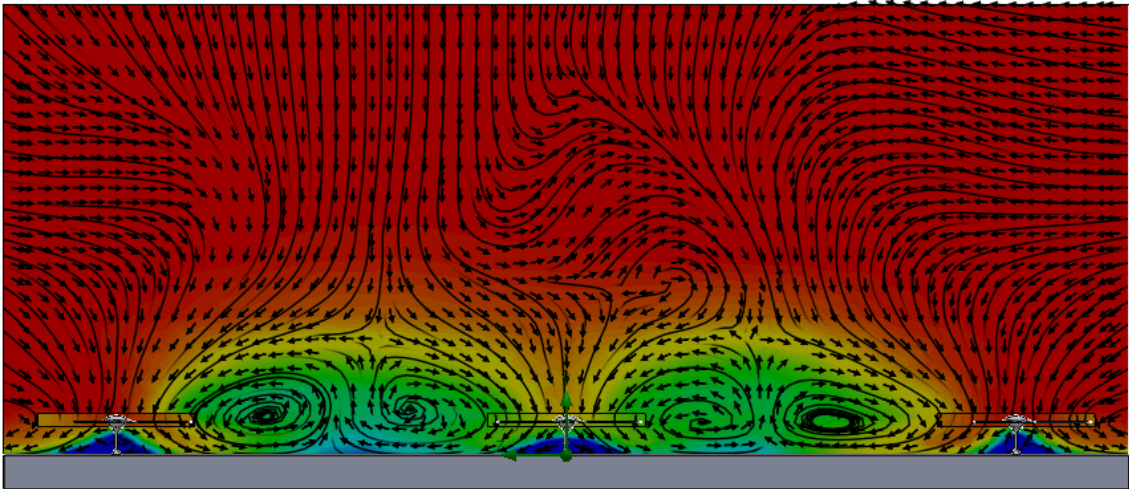


Fig. 30. Mapa de temperatura, líneas de corriente y vectores de velocidad de un estudio transversal (alzado), con un flujo descendente.  
Fuente: Elaboración propia

Al igual se sucede con la configuración anterior, cuando la capacidad de enfriamiento se duplica tiene un impacto mayor en la altura de 0.6 m (Fig. 25a), lo que incrementa la diferencia de temperatura entre alturas.

El aumento de la velocidad anular también produce en el mismo efecto en la configuración anterior, el aire se eleva a demasiada velocidad, impidiendo que el aire se enfríe correctamente (Fig. 26).

Sin duda, el mejor resultado se ha obtenido con la instalación de 4 ventiladores más (Fig. 27 y 30). Los 8 ventiladores que rodean al ventilador central consiguen retener el aire dentro de la superficie de enfriamiento y elevarlo generando una corriente convectiva.

## Conclusiones

- Durante la última década, se ha acelerado el desarrollo y la investigación del sistema de refrigeración por suelo refrescante debido fundamentalmente a que los inconvenientes que tiene, se pueden mitigar con algunos sistemas complementarios.
- El sistema de refrigeración por suelo refrescante es más eficiente que los sistemas HVAC convencionales, especialmente cuando incide radiación solar directamente sobre la superficie del suelo, debido al aumento en la capacidad de enfriamiento.
- El intercambio de calor entre el suelo refrescante y el aire se produce de dos maneras: por radiación y por convección. Debido a las peculiaridades del suelo refrescante la transferencia de calor por convección solo supone el 7% del total, según los resultados experimentales.
- El rendimiento del suelo refrescante es difícil de predecir con exactitud debido al gran número de factores que lo determinan como, por ejemplo: la incidencia de radiación solar y su variación a lo largo del tiempo, la radiación que emiten las paredes y el techo (onda larga), los obstáculos que puede haber sobre el suelo, etc.
- Según las simulaciones realizadas, la instalación de ventiladores en el techo tiene un rendimiento menor que cuando se instalan en el suelo. La mayor distancia al suelo aumenta la turbulencia del flujo produciendo importantes diferencias de temperatura a una misma altura, produciendo una merma en el confort térmico.
- En todas las configuraciones en las que se aumenta la capacidad de enfriamiento, se consigue disminuir de forma relevante la temperatura a una altura de 0.6 m, pero tiene muy poca afectación a una altura de 1.1 m. Este hecho, una vez más, produce una mayor diferencia entre alturas lo que conlleva una merma en el confort térmico.
- Los ventiladores instalados en el suelo son mucho más eficaces a la hora de inducir una corriente convectiva, además generan mapas de temperatura mucho más homogéneos.
- La instalación de ventiladores aporta mucha más flexibilidad al suelo refrescante. La capacidad de enfriamiento es un parámetro difícil de modificar en un corto periodo de tiempo, pero la velocidad angular se puede modificar prácticamente al instante. Esto permite al sistema adaptarse rápidamente ante una modificación repentina del entorno. Por ejemplo, si hay un gran aumento de afluencia en una sala, los ventiladores

pueden reducir su velocidad angular para que el aire tarde más en ascender y, por lo tanto, se enfríe más.

- Para un sistema de suelo refrescante convencional se establece una temperatura mínima en la superficie del suelo de 19 °C, fundamentalmente para evitar diferencias importantes de temperatura entre distintas alturas. Con la instalación de ventiladores y en climas secos para evitar la condensación, se podría bajar de los 19 °C sin que afectase negativamente al confort térmico.

## Bibliografía

1. Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. Application of radiant floor cooling in large space buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 55 1083–1096 (2016).
2. Olesen, B. Radiant floor cooling systems. *ASHRAE Journal* **50**, (2008).
3. Daou, K., Wang, R. Z. & Xia, Z. Z. Desiccant cooling air conditioning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 10 55–77 (2006).
4. Simmonds, P., Mehloimakulu, B. & Ebert, T. Radiant cooled floors - Operation and control dependant upon solar radiation. in *ASHRAE Transactions* vol. 112 PART 1 358–367 (2006).
5. Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. Application of radiant floor cooling in a large open space building with high-intensity solar radiation. *Energy and Buildings* **66**, 246–257 (2013).
6. Ashrae. ASHRAE handbook: HVAC systems and equipment. *Ultraviolet Lamp Systems* 11–17 (2016).
7. Olesen, B. W., Bonnefoi, F., Michel, E. & de Carli, M. *Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling--Theory or a question of definition.* (2000).
8. Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. Cooling capacity prediction of radiant floors in large spaces of an airport. *Solar Energy* **113**, 221–235 (2015).
9. Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. On-site measured performance of a radiant floor cooling/heating system in Xi'an Xianyang International Airport. *Solar Energy* **108**, 274–286 (2014).
10. AC08024865, A. *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* (ISO, 2005).
11. STANDARD, B. Heating systems in buildings—Design of embedded water based surface heating and cooling systems. (2008).
12. Zhou, X. *et al.* Thermal comfort under radiant asymmetries of floor cooling system in 2 h and 8 h exposure durations. *Energy and Buildings* **188–189**, 98–110 (2019).
13. Yang, W., Shi, D. X. & Zou, Y. R. Energy consumption status and energy efficiency diagnosis for air conditioning system in air terminal building of Chengdu Shuangliu International Airport. *HV&AC* **41**, 31–35 (2011).
14. Pantelic, J. *et al.* Full scale laboratory experiment on the cooling capacity of a radiant floor system. *Energy and Buildings* **170**, 134–144 (2018).
15. Stetiu, C. Energy and peak power savings potential of radiant cooling systems in US commercial buildings. *Energy and Buildings* **30**, 127–138 (1999).
16. Hu, R. & Niu, J. L. A review of the application of radiant cooling & heating systems in Mainland China. *Energy and Buildings* vol. 52 11–19 (2012).
17. Holst, S., Reuss, S., Simmonds, P. & Gaw, W. *Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions.*
18. Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. Dynamic performance of water-based radiant floors during start-up and high-intensity solar radiation. *Solar Energy* **101**, 232–244 (2014).
19. Olesen, B., de Carli, M., Scarpa, M. & Koschenz, M. Dynamic evaluation of the cooling capacity of thermo-active building systems. *ASHRAE Transactions* **112**, 350–357 (2006).



20. Zhang, L., Zhao, K., Liu, X. H. & Jiang, Y. The characteristics of infiltration air in large space buildings. *7th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning - Proceedings of ISHVAC 2011* **3**, 781–786 (2011).
21. Liu, X. H., Jiang, Y. & others. Temperature and humidity independent control air-conditioning system. *China Architecture & Building Press, Beijing* (2006).