

REFRESCAMIENTO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS MEDIANTE PANELES CERÁMICOS VERTICALES DE GRAN FORMATO

**V. Echarri Iribarren; A. González Avilés; M^a I. Pérez Millán,
C. Aliaga Fernández**

Cátedra Cerámica de la Universidad de Alicante

Grupo de Investigación Tecnología y Sostenibilidad en Arquitectura

Victor.Echarri@ua.es

RESUMEN

La comunicación que se presenta desarrolla el acondicionamiento térmico de espacios a través de la Patente Nacional de referencia 201001626, que ha desarrollado el grupo de investigación en colaboración con ASCER y AICE. Consiste en paneles de gran formato compuestos por gres porcelánico de 3 mm de espesor, tramas capilares de polipropileno, pasta conductora, y otra pieza de gres porcelánico de 3 mm. Se hace circular agua fría a 17°C por las tramas capilares. Dichos paneles se colocan verticalmente suspendidos del techo. Se ha procedido a determinar, a través de programas de simulación, el comportamiento de las corrientes de convección que se generan en los espacios en función de la altura libre, y el gradiente térmico del aire, en comparación con el mismo sistema dispuesto a modo de falso techo horizontal. Por último se establece cuál sería la disipación de energía del usuario por radiación y convección con el aire circundante en ambos sistemas.

El refrescamiento de espacios por superficies radiantes a través de tramas capilares de tubos de polipropileno es un sistema de climatización muy confortable y eficiente en el uso de la energía. Además de su aplicación en techos registrables, en enlucidos de yeso en techos y paredes, y en suelos, existe una aplicación singular: el sistema de paneles metálicos colgados del techo y dispuestos en posición vertical, denominado sistema "baffle".

En la actualidad los sistemas de acondicionamiento por superficies radiantes se resuelven mediante sistemas de distribución de agua fría o caliente, o mediante folio radiante (resistencias eléctricas por efecto joule). Dentro de los sistemas de acondicionamiento por distribución de agua fría o caliente existen sistemas de tubo grueso y sistemas de tubos capilares de polipropileno, de diámetros internos de aproximadamente 3 milímetros. Los sistemas de tubos capilares disponen de una serie de tubos finos en paralelo, con una separación aproximada de 8 milímetros. Dichos tubos parten de un tubo colector de ida de mayor diámetro y finalizan en un tubo colector de retorno del mismo diámetro. De esta forma se confeccionan tramas a base de tubos capilares en paralelo, de superficie variable en función de la geometría que se quiera adoptar. Por las tramas circula agua fría o caliente proveniente de unidades enfriadoras, calderas, sistemas de absorción, etc.

La eficacia del intercambio energético de los sistemas de tubos capilares es muy superior en comparación con los sistemas de tubo grueso, debido principalmente a contar con una mayor superficie total de intercambio y un menor espesor de los tubos, siendo necesario esperar un tiempo mucho más corto para lograr el acondicionamiento necesario.

Recientemente el grupo de investigación "Tecnología y Sostenibilidad en Arquitectura", de la Universidad de Alicante, en colaboración con ASCER y el ITC, dentro del proyecto de investigación "4 senses", ha desarrollado una patente consistente en un panel cerámico de acondicionamiento térmico, que incorpora tramas capilares de polipropileno, con referencia de solicitud de Patente Nacional 201001626 [1]. El panel se estructura en cuatro partes fundamentales:

- Pieza cerámica. Puede ser de cualquier formato, textura, espesor o forma. La pieza cerámica es de gres porcelánico de bajo espesor, concretamente de 3 ó 4 milímetros para darle mayor ligereza y facilidad de montaje y desmontaje.
- Interfaz adhesivo de unión entre la pieza cerámica y la trama capilar. Consiste en un material adhesivo compatible químicamente con la cerámica y el polipropileno, según sea el tipo de trama que se disponga para el acondicionamiento térmico. Se trata de un material que favorece la transmisión térmica, como por ejemplo pasta conductora o similar, de manera que envuelve en toda su superficie a los tubos capilares.
- Una trama capilar de tubos de polipropileno. Dicha trama es de superficie similar a la de la pieza cerámica, de manera que cada pieza cerámica dispone de una trama independiente. Dicha trama dispone de un tubo colector de

ida y otro de retorno, de diámetro adecuado al caudal total de la trama, y se conectan a los tuberías de distribución de agua de ida y retorno mediante latiguillo flexible y unión tipo clic & cool o similar.

- Una segunda pieza cerámica de gres porcelánico de bajo espesor, de 3 ó 4 milímetros, similar a la anterior, con la que el panel queda finalizado en el mismo material y con las mismas cualidades de comportamiento térmico en toda su superficie.

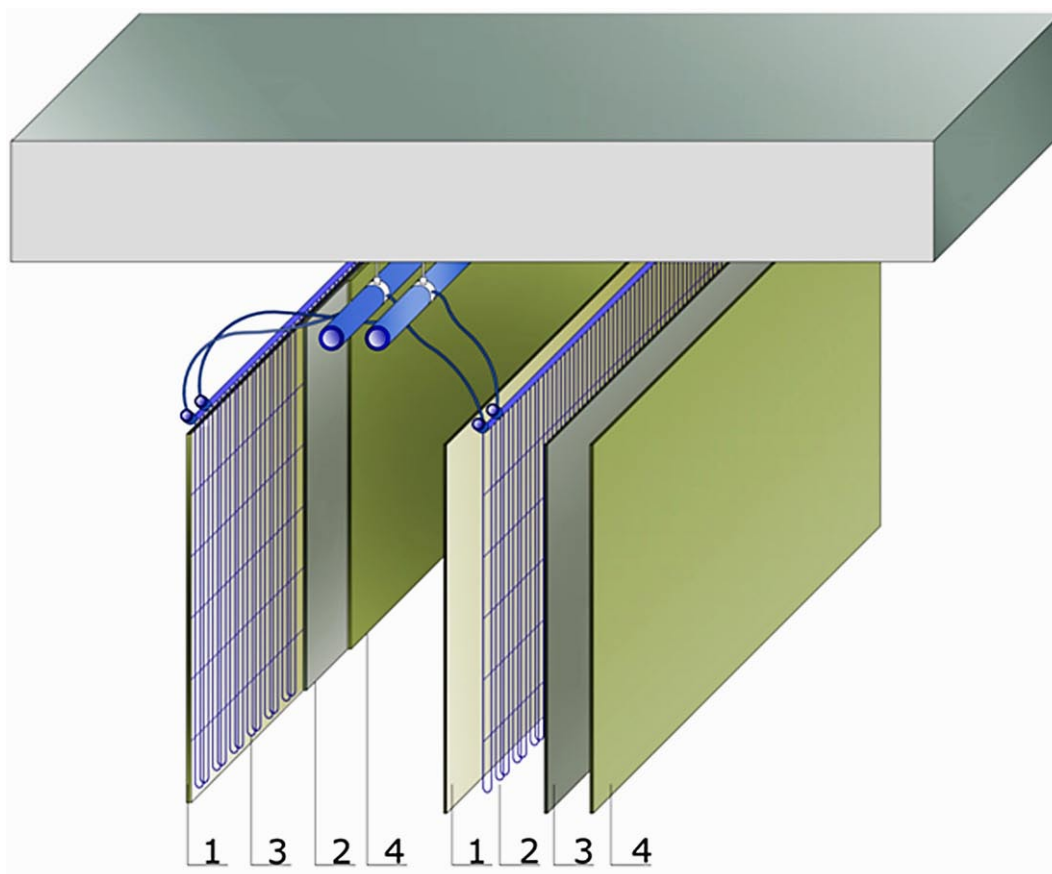


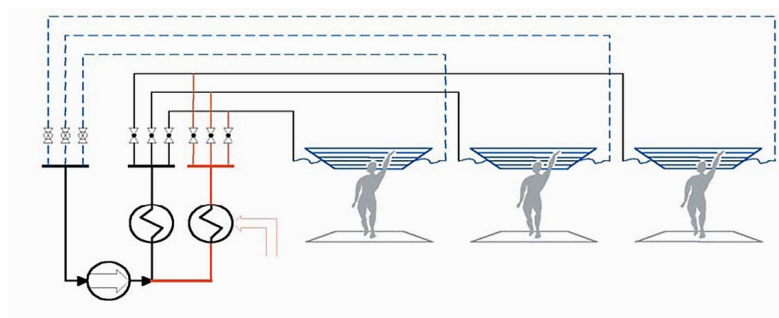
Fig. 1. Panel de acondicionamiento térmico cerámico

Dichos paneles, de 15 mm. de espesor, se colocan verticalmente suspendidos del techo. Se hace circular por las tramas agua a 17°C, de manera que el agua recibe por conducción a través de las paredes de polipropileno, calor procedente de la pasta conductora, y en definitiva de las piezas cerámicas de gran formato y de 3 mm. de espesor a cada lado de la trama. El calor producido en el interior del espacio por las diversas cargas térmicas es recogido por el caudal másico del agua y transportado hasta una enfriadora o bomba de calor, donde se vuelve a enfriar a los 17°C de temperatura de distribución del agua.

El esquema de principio de la instalación requiere habitualmente de diversos circuitos de distribución, con válvulas termostáticas en cada uno de ellos, y válvulas de equilibrado de caudal o caudalímetros. Esta disposición de elementos del circuito secundario, además de las bombas circuladoras, del intercambiador de placas del circuito primario, y del vaso de expansión, se suelen prefabricar en ta-

ller. De esta forma se garantiza una correcta distribución del agua en los circuitos, según los caudales de proyecto, y lográndose un perfecto equilibrio y control de zonificación del acondicionamiento.

Este sistema de acondicionamiento térmico de espacios requiere de un sistema de deshumidificación para contrarrestar, por una parte, las cargas latentes producidas por las personas y el aire de infiltración, además de evitar que se lleguen a niveles no deseados de humedad relativa, que podrían ocasionar humedades de condensación en los paneles de cerámica por encontrarse a una temperatura próxima a la de rocío. Habitualmente se dispone uno o varios fan-coils de bajo caudal, en los que se produce la deshumidificación, y con los cuales la velocidad del aire recirculado es prácticamente imperceptible, así como el nivel sonoro producido por los ventiladores. Se trata de un acondicionamiento silencioso, en el que no se produce aire frío de impulsión en la zona de ocupación, sino únicamente una ligera renovación del aire [2] y deshumidificación.



Esquema de una subestación con distribución a 3 tubos.

1 = Bomba, 2 = intercambiador frío, 3 = intercambiador calor,
4 = regulador de caudal, 5 = válvulas frío, 6 = válvulas calor,
7 = conexión agua caliente



Fig. 2. Sistema a 3 tubos

Para evitar el riesgo de humedades de condensación, que podría darse en condiciones de máxima producción de cargas latentes, o en periodos en que el aire exterior tenga una excesiva humedad relativa, se dispone de sondas de humedad relativa en los paneles cerámicos, de manera que si se detectasen dichas humedades de condensación, la sonda ordenaría que la válvula termostática se cerrara impidiendo el paso de agua fría en el circuito o circuitos correspondientes. Se evitan, de esta forma autorregulada, las condensaciones superficiales. Una vez desaparecido el riesgo de condensación, la válvula se vuelve a abrir automáticamente y el agua fría vuelve a circular.

En los sistemas de suelo radiante de tubo grueso, se dispone de una capa de mortero de cemento con aditivos plastificantes y que mejoran la conductividad térmica de 6 cm. de espesor, de manera que el sistema, en su funcionamiento, primero calienta o enfría esta capa de mortero de cemento. Este proceso puede durar entre una y dos horas. Una vez que esta capa ha variado su temperatura, el

pavimento recibe a su vez esta variación por conducción de calor, y la superficie del pavimento se encarga de realizar un intercambio energético por radiación con el resto de paramentos, las personas, y el aire, generando en este último caso unas corrientes de convección [3][4]. El acondicionamiento se realiza por tanto por radiación y convección, en una proporción 60%-40%. Y además el sistema presenta una importante inercia térmica, que estabiliza las posibles variaciones de cargas térmicas en el aire, ya que la convección supone menos del 40% del acondicionamiento, y hace que se siga efectuando un intercambio energético durante cierto tiempo aunque se haya interrumpido la circulación del agua por los circuitos.

Realizar la distribución de agua en los circuitos por techo es más difícil de implementar que en el suelo, dado que las tuberías no pueden envolverse en morteros, sino que se montan en una cámara de aire, que es la que intercambia calor con el material de construcción. Sin embargo, presenta la ventaja de tener mayor superficie de intercambio al no recibir muebles, y favorece las corrientes de convección en el caso de refrescamiento en régimen de verano. En el caso que nos ocupa, al haber optado por una solución tipo "baffle", los paneles están en posición vertical, y no existe una cámara de aire con el falso techo. Los paneles cerámicos, una vez estén a temperatura de 17-18 °C por la circulación del agua fría a través de las tramas, emitirán radiación hacia el techo, las paredes y el suelo.

La eficacia en el intercambio de energía radiante tiene relación con la distancia y con la geometría. Este último factor se determina a través del factor forma, complejo de calcular, pero que en espacios habituales en edificación adopta el valor de 0,4 del techo al suelo, y de 0,15 del techo a las paredes. De esta forma podríamos obtener la temperatura radiante media.

En esta investigación se ha determinado un espacio de superficie 240 m² (12 x 20 m.), y altura libre 6 m., para posible usos de sala de exposiciones, salón de actos, etc. Los cerramientos del espacio presentan las siguientes características:

Aire

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Densidad	1.1	kg/m ³	Constante
Conductividad térmica	0.027	W/(m.K)	Constante
Calor específico	1000	J/(kg.K)	Constante

Cerramiento de vidrio doble con cámara

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Densidad	2457.6	kg/m ³	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	9e-006	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	0.74976	W/(m.K)	Constante
Calor específico	834.61	J/(kg.K)	Constante

Cerramiento multicapa de dos hojas con aislante y cámara de aire:

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Densidad	1600	kg/m ³	Constante
Coeficiente de dilatación térmica	1.08e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	7.5521	W/(m.K)	Constante
Calor específico	877.96	J/(kg.K)	Constante

Panel cerámico que contiene tramas capilares:

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Densidad	2300	kg/m ³	Constante
Coeficiente de dilatación térmica	1.08e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	1.4949	W/(m.K)	Constante
Calor específico	877.96	J/(kg.K)	Constante

Con el fin de investigar en la calidad del acondicionamiento térmico en régimen de verano, se han realizado comprobaciones de la energía radiante que recibirían las personas en la zona de ocupación, a través de la temperatura radiante media de los paramentos, así como determinar las corrientes de convección que se producirían y cómo afectarían al acondicionamiento. Para ello, a través de la herramienta "Cosmosworks professional", se han definido unos paramentos determinados, con un frente de acristalamiento doble en toda su superficie, y las temperaturas de los paramentos en función de la temperatura exterior de cálculo y las conductancias obtenidas según CTE [5]. Se han aplicado las técnicas de simulación de comportamiento del aire en el equilibrio térmico, con un estudio del gradiente térmico del aire en todo el volumen. Se ha realizado una comparativa para dos casos diferentes:

1. Refrescamiento por techo radiante mediante los paneles cerámicos de gran formato que contienen tramas capilares en toda su superficie, descolgados del techo en posición horizontal, a modo de falso techo con cámara de 1 m. de altura libre.
2. Refrescamiento mediante los paneles cerámicos de gran formato que contienen tramas capilares de polipropileno en posición o tipología "baffle". La separación entre estos paneles será de 1 m., según se muestra en el gráfico.

Con objeto de realizar un comparativo técnico homogéneo, ambos recintos han sido sometidos a la misma carga térmica, y se han seleccionado los siguientes parámetros y condiciones térmicas:

Temperatura-1 <placas termicas-1>	Techo radiante con temperatura 290 Kelvin (17°C)
Convección-1 <cerramiento vidrio-2>	Coefficiente de convección 30 W/(m².K) y temperatura volumétrica 308 Kelvin (temperatura del entorno de 35°C)
Convección-2 <paredes-1>	Coefficiente de convección 15 W/(m².K) y temperatura volumétrica 299 Kelvin (temperatura del entorno)
Flujo de calor-1 <cerramiento vidrio-2>	Flujo de calor de 150 W/m²

Se considera una temperatura exterior de cálculo de 35 °C, con un flujo de calor a través del cerramiento de vidrio doble de 150 W/m², y un coeficiente de convección de 30 W/m²h, y una temperatura del aire del espacio superior de 26°C, así como un coeficiente de convección de 15 W/m²h [6]. La temperatura superficial del panel cerámico de acondicionamiento térmico es de 17°C en ambos casos, temperatura que no puede descender en ningún caso, pues se producirían en las condiciones establecidas condensaciones superficiales.

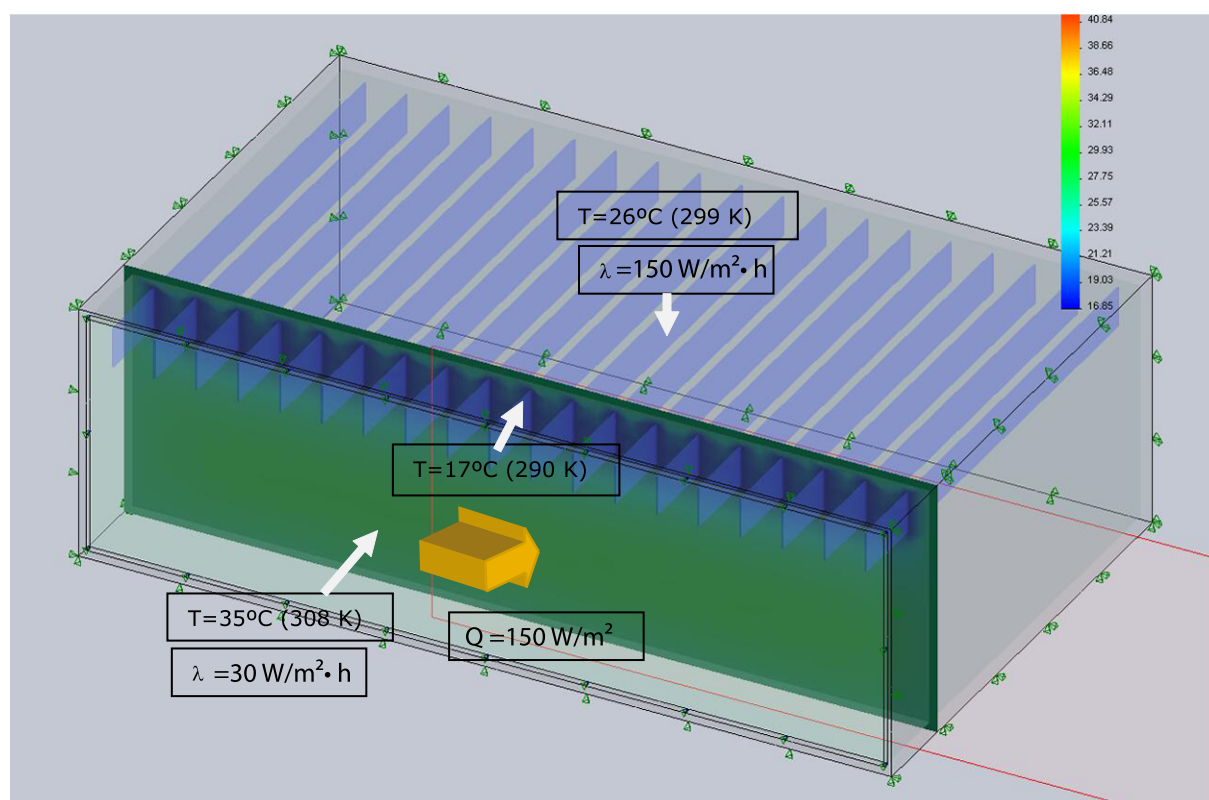


Fig. 3. Características del espacio y condiciones térmica

Se ha procedido a efectuar los cálculos de comportamiento térmico a través de la determinación del factor forma para la energía de radiación, y de la herramienta de simulación para establecer las isotermas y gradiente térmico del aire según las corrientes de convección que se producen en ambos casos. La determinación de la temperatura del aire en la zona de ocupación, teniendo en cuenta que

la velocidad del aire en la convección se ha estimado según método experimental en 0,05 m/s, hacen posible cuantificar el intercambio energético convectivo del sujeto en cualquier ubicación del espacio.

En cuanto a la energía radiante, a través de las expresiones:

$$q_{rd} = \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

$$q_{rdi} = h_r (T_i - T_{rm}) \quad (2)$$

$$T_{rm} = \frac{T_s + 0,15 \cdot (T_{p1} + T_{p2} + T_{p3} + T_{p4}) + 0,4 \cdot T_t}{2} \quad (3)$$

T_{rm} : temperatura radiante media

T_s : temperatura superficial del suelo

T_p : temperatura superficial de las paredes 1, 2, 3 y 4

T_t : temperatura superficial del techo

ε : emisividad de las superficies

h_r : coeficiente de pérdidas por radiación de un individuo

se han determinado los factores forma de ambas geometrías o disposiciones de los paneles, según la experiencia adoptada por M. Ortega y A. Ortega [7], por la cual el factor forma de suelo a techo es de 0,4, el de techo a pared de 0,15, y el de los paneles cerámicos a pared de 0,10, teniendo en cuenta que no ocupan toda la superficie del paramento, sino únicamente una sexta parte. Así podríamos obtener la temperatura radiante media en ambos casos, teniendo en cuenta que en la tipología baffle la superficie radiante de los paneles es el doble que el caso del falso techo, y que la superficie no visible desde la posición del sujeto, que será la mitad aproximadamente, emitirá radiación por reflexión sobre los paneles contiguos:

$$T_{rm} = \frac{T_s + 0,15 \cdot (T_{p1} + T_{p2} + T_{p3} + T_{p4}) + 0,4 \cdot T_t + 0,1 \cdot (T_{pc} \cdot n)}{2} \quad (4)$$

T_{pc} : temperatura superficial de los paneles cerámicos descolgados

n : número de paneles cerámicos por cada metro lineal de techo

Los resultados obtenidos de la temperatura radiante media ha sido de 21,9 °C para la solución de piezas horizontales, y 22,8 °C para la de piezas tipo baffle, siendo T_{pc} 18 °C y $n = 1$.

Para el coeficiente hr , de pérdidas por radiación del individuo, hemos estimado un valor de $4,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ tanto para el caso del falso techo como para el caso de los paneles tipo baffle [8]. La temperatura superficial del cuerpo humano se ha estimado en 30°C . Por tanto los intercambios de calor por radiación del cuerpo humano con las superficies del entorno serán, para metro cuadrado de superficie corporal, según la expresión (2):

$$q_{radi} = 4,7 \cdot (30^\circ\text{C} - 21,9^\circ\text{C}) = 38,07 \text{ W/m}^2 = 38,07 \text{ W/m}^2$$

$$q_{radi} = 4,7 \cdot (30^\circ\text{C} - 22,8^\circ\text{C}) = 33,84 \text{ W/m}^2 = 33,84 \text{ W/m}^2$$

De donde podemos concluir que la efectividad del sistema baffle en cuanto al condicionamiento por superficies radiantes sobre el usuario es del 88% respecto del sistema de falso techo tradicional, un valor más que satisfactorio si tenemos en cuenta la variación de disposición geométrica.

Por lo que respecta al flujo de calor por corrientes de convección con el aire que circunda al individuo, a través de las expresiones:

$$q_{cv} = h_c(T_p - T_a) \quad (5)$$

$$h_c = 8,3 \cdot (v^{0,24}) \quad (6)$$

$$q_{cvi} = h_c(T_i - T_a) \quad (7)$$

q_{cv} : flujo de calor por convección

q_{cvi} : pérdidas por convección por metro cuadrado de superficie corporal

v : velocidad del aire $0,05 \text{ m/s}$

T_i : temperatura de la superficie de la piel.

T_a : temperatura del aire ambiente.

Podemos determinar que el factor de termotransferencia h_c , en ambos casos, al no depender de la geometría de posición de los paneles es:

$$h_c = 8,3 \times 0,05^{0,24} = 3,89 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{individuo de pie})$$

$$h_c = 8,3 \times 0,05^{0,6} = 1,38 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{individuo sentado})$$

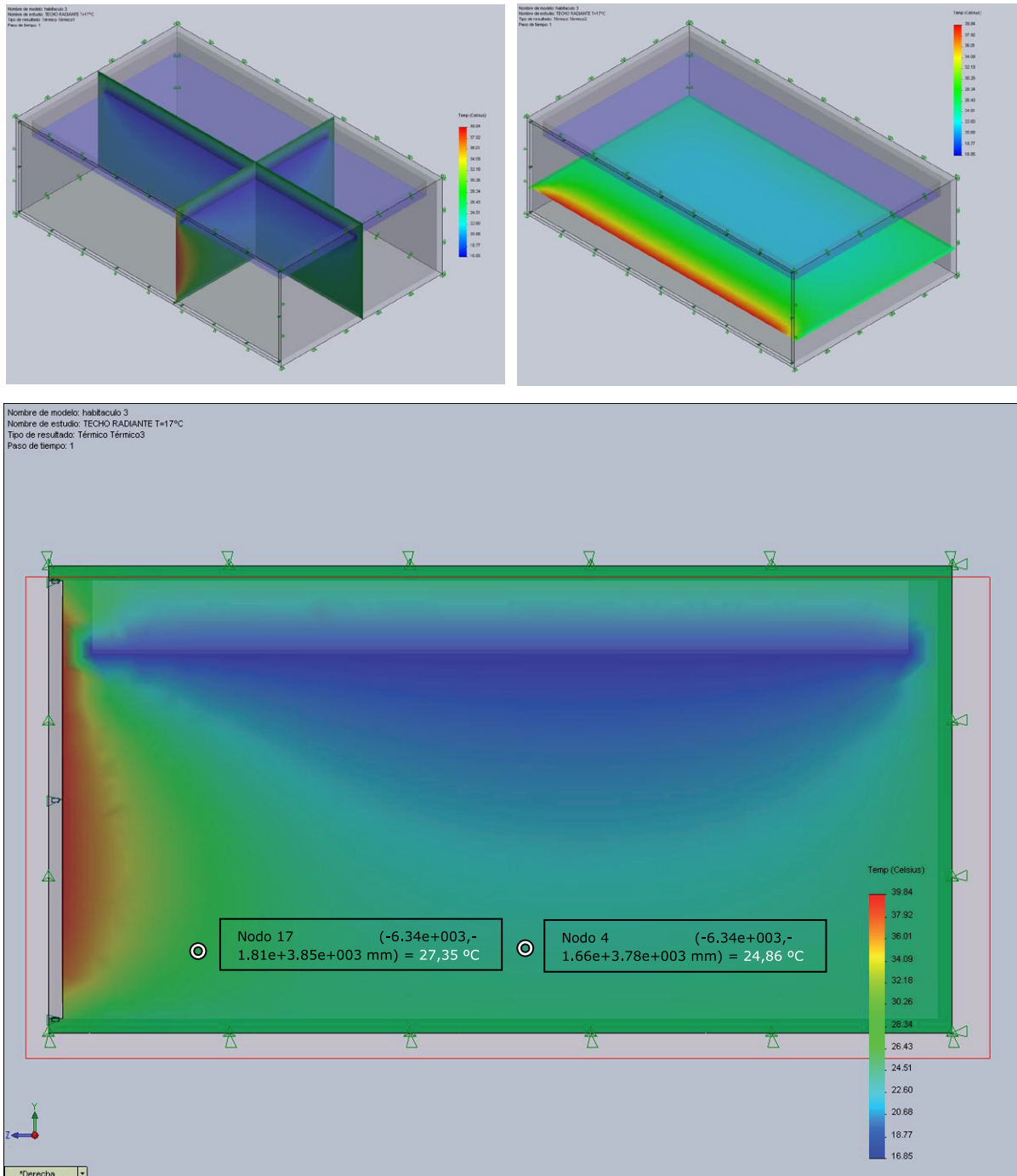


Fig. 4. Temperaturas de aire en sección tipo falso techo cerámico horizontal

Con el fin de determinar el flujo de calor por convección que experimenta el individuo, según el parámetro anterior, se ha analizado el valor de la temperatura del aire según las condiciones antes descritas, es decir, con un paramento de vidrio a 28 °C de temperatura, con temperatura exterior de 35 °C, flujo de calor de 150 W/m² a través del acristalamiento, y temperatura de los espacios circundantes de medianería de 26 °C. Dichas temperaturas del aire se reflejan en las figuras 4, y 5.

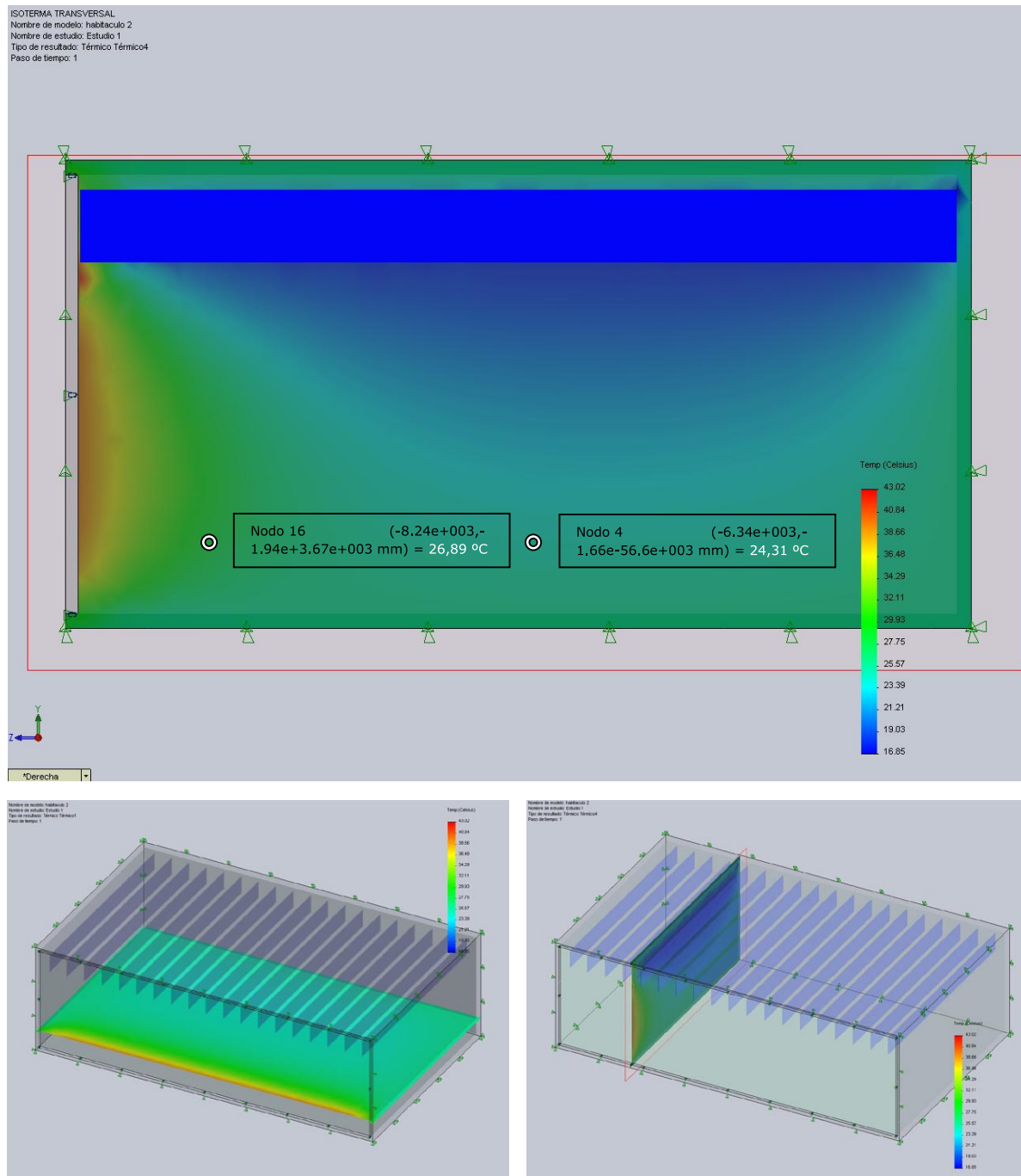


Fig. 5. Temperaturas de aire en sección tipo baffle

Como se observa, las temperaturas del aire en la zona de ocupación son inferiores para el caso tipo baffle. Se ha determinado la temperatura media en la zona de ocupación en dos posiciones distintas, según proximidad al vidrio: la primera a 2 m. de separación, y la segunda en el centro, a 6 m. de separación. Las temperaturas obtenidas se reflejan en el *Cuadro 1*: a 2 m. es de 27,35 °C frente a 26,89 °C para los baffles, y 24,86 °C frente a 24,31 a 6 m. de separación respecto del vidrio.

Teniendo en cuenta que la temperatura corporal es de 30°C y las temperaturas medias obtenidas, se podría ya determinar el valor del flujo de calor corporal por metro cuadrado de superficie corporal por convección según la expresión (7):

$$q_{cvi} = 3,89 (30^{\circ}\text{C} - 27,35) = 10,3 \text{ W/m}^2 \quad q_{cvi} = 3,89 (30^{\circ}\text{C} - 26,89) = 12,1 \text{ W/m}^2$$

$$q_{cvi} = 3,89 (30^{\circ}\text{C} - 24,86) = 19,9 \text{ W/m}^2 \quad q_{cvi} = 3,89 (30^{\circ}\text{C} - 24,31) = 22,1 \text{ W/m}^2$$

Se concluye que, para un individuo de pie, el flujo de calor por convección es entre un 10 y un 17% superior en el caso del sistema baffle, según el individuo se encuentre más alejado o más próximo al acristalamiento.

Como resumen de los resultados obtenidos se ha elaborado el *Cuadro 1*, en el que se determinan los flujos de calor del individuo tanto por radiación como por convección. Se puede observar que para el espacio tipo estudiado, la suma de estos dos flujos permanece casi inalterada. Considerando el escaso efecto que el flujo de calor por transmisión tiene en la disipación total del calor del individuo, y que el efecto de flujo de calor por evaporación –respiración y sudoración– serán similares, pues la humedad relativa se controlará a través de la deshumidificación que efectuarán algunos fan-coils de pequeña potencia, podemos concluir que el sistema tipo baffle aporta un satisfactorio acondicionamiento.

	T_t	T_s	T_{mp}	T_{rm}	v	h_c	h_r	T_a	q_{rdi}	q_{cvi}	$q_{rdi}+q_{cvi}$
Techo Radiante Frío mediante Paneles Cerámicos Horizontales	17	20	24	21,9	0,05	3,89	4,7	27,3	38,0	19,9	57,9 W/m ²
Techo Radiante Frío mediante Paneles Cerámicos Sistema Baffle	17	20	24	22,8	0,05	3,89	4,7	26,8	33,8	22,1	55,9 W/m ²

Cuadro 1.

CONCLUSIONES

El sistema de acondicionamiento térmico por paneles cerámicos de gran formato que incorporan tramas capilares de polipropileno descolgados del techo en posición baffle se muestran muy eficientes para lograr una climatización silenciosa y más saludable, con probados ahorros energéticos.

La posición baffle respecto del falso techo horizontal tradicional presenta algunas diferencias en cuanto a la eficacia en acondicionamiento. El flujo de calor por radiación entre la persona y los paramentos que conforman la arquitectura de las salas, en la que el techo está a 17-18°C, es aproximadamente de un 89% del baffle respecto del techo horizontal, en espacios de gran altura y dimensión, debido al factor forma.

Respecto del flujo de calor por convección entre la persona de pie y el aire circundante en el espacio, el valor de éste es superior entre un 10% y un 17% en el caso de la posición baffle, debido a que se favorece las corrientes de convección, con una temperatura del aire ligeramente inferior en la zona de ocupación. De esta forma se logra un acondicionamiento muy similar al del panel de falso techo, ya que la consideración de ambos factores –convección y radiación- se equilibra en el cómputo final (96%). Es preciso señalar que en ambos casos se requiere un mínimo de deshumidificación del aire -según establece el RITE- a través de un fan-coil derivado de la red de distribución de agua fría, ya que el sistema de tramas capilares en sí no es capaz de hacerlo

La cerámica se presenta como un buen material de acabado de los paneles, ya que su alta conductividad térmica favorece la transmisión de calor hacia el agua que circula por las tramas capilares.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Panel de Acondicionamiento Térmico Cerámico*. Referencia de solicitud de Patente Nacional 201001626. Proyecto de I+D+I "4 senses". Diciembre de 2010. Solicitantes: Universidad de Alicante, ASCER, AICE.
- [2] RITE. Capítulo II. Artículo 11. UNE-EN 15251.
- [3] Dong, M. N. et al., 2008, Quantitative analysis on the effect of thermal bridges on energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter region: Chongqing Jianzhu Daxue Xuebao/*Journal of Chongqing Jianzhu University*, v. 30, p. 5-8.
- [4] F. Javier LÓPEZ RIVADULLA; Víctor ECHARRI IRIBARREN; Patricia ALONSO ALONSO; Joaquín FERNÁNDEZ MADRID. " Fachada ventilada. Pérdidas energéticas derivadas del sistema de anclaje", CONGRESO DE PATOLOGÍA Y REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS (PATORREB), Oporto-Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto, Marzo 2009.
- [5] CTE. DB HE. Ahorro Energético. Apéndice E. *Cálculo de los parámetros característicos de la demanda*. E1. Transmitancia térmica.
- [6] Bartomeu SIGALÉS I PUEYO. *Transmissió de calor. Vol.3. Convecció sense canvi de fase*. Edicions de la UPC, Barcelona, 1990.
- [7] Mario Ortega Rodríguez; Antonio Ortega Rodríguez. *Calefacción y Refrescamiento por Superficies Radiantes*. Paraninfo, Madrid, 2001, p.11.
- [8] *Ibíd*em, p.12.