

INFLUENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL ZONIFICADO EN LA COMBINACIÓN DE UN SUELO RADIANTE REFRESCANTE CON UN FANCOIL DE CONDUCTOS

Francisco Fernández Hernández¹, Antonio Atienza Márquez¹, José Miguel Peña Suárez², Juan Antonio Bandera Cantalejo², Irene Fernández Jiménez² y Mari Carmen González Muriano²

1: GEUMA (Grupo de Energética de la Universidad de Málaga), Escuela de Ingenierías, Universidad de Málaga; 2: Corporación Empresarial Altra S.L. Málaga, España

Francisco Fernández Hernández
franciscofh@uma.es

.....

Resumen: La aerotermia está siendo promovida como solución en el sector residencial tanto para la producción de agua caliente sanitaria como para la climatización con instalaciones con agua, reemplazando a la energía solar térmica y los equipos de expansión directa.

Este estudio presenta el análisis, desde el punto de vista del confort térmico y el consumo de energía, de un sistema de control zonificado aplicado a una instalación de suelo radiante y fancoil de conductos, comparado con un sistema de suelo radiante y fancoils individuales. El sistema de control incluye el uso eficiente combinado de ambas unidades terminales. La capacidad de refrigeración del suelo refrescante está limitada y en climas cálidos es necesario el uso del fancoil para asegurar el confort térmico y combatir la carga latente de la zona. El sistema se ha modelado en Trnsys17 y el caso de estudio se ha aplicado a una vivienda residencial y en diferentes zonas climáticas.

Palabras clave: Suelo radiante frío, sistema de control zonificado, fancoil de conductos, control combinado, confort térmico.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en países europeos como España, Francia o Italia entre otros, la aerotermia se ha impulsado en el proceso de descarbonización en el sector residencial como solución para cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) y de calefacción y climatización, sustituyendo a los captadores solares térmicos y a los sistemas convencionales de climatización de expansión directa, respectivamente. Las principales razones son su alto rendimiento térmico y la capacidad de cumplir con la contribución mínima de energía renovable establecida por la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [1]. Por consiguiente, la tendencia tradicional de utilizar un sistema inverter de expansión directa por conductos basado en el control on/off de una sola zona [2] en el sector residencial está siendo sustituida por la aerotermia, con la que se pueden combinar diferentes unidades terminales: radiadores, suelo radiante y fancoils.

El suelo radiante es una opción segura, principalmente en climas muy fríos, por su excelente funcionamiento para calefacción en términos de confort y eficiencia [3]. Sin embargo, en refrigeración la temperatura del suelo está limitada por la temperatura de rocío del aire del local con el fin de evitar la condensación de la humedad del aire, lo que reduce la potencia que es capaz de absorber a unos 50 W/m² [4]. Por este motivo, en climas cálidos una alternativa es combinarlo con fancoils, que trabajan con temperaturas de producción menos favorables

que el suelo radiante pero tienen tiempos de respuesta frente a cambios de carga en la zona mucho más rápidos.

Sin embargo, el funcionamiento de las dos unidades terminales no es fácil ya que requiere un sistema de control que asegure un correcto funcionamiento de ambas. En la literatura existen numerosos artículos con complejos sistemas de control como los modelos predictivos, de lógica borrosa, redes neuronales, etc., aplicados a sistemas con fan coils [5] y suelo radiante [6], pero no se han encontrado estudios que integren el funcionamiento de ambos a la vez. Además, a estos tipos de sistemas, existen estudios que ponen en duda su practicidad por el alto coste inicial, computacional, problemas de estabilidad del controlador o falta de expertos en la materia [7].

En la actualidad, la configuración compuesta por una bomba de calor con suelo radiante y fancoil de individuales es una de las opciones más elegidas como sistema confortable y eficiente, donde el suelo radiante funciona en modo calefacción y los fancoils individuales en modo refrigeración. El control de este sistema permite asegurar el confort en cada zona de la vivienda ya que se instala un termostato en cada zona que permite que o el suelo radiante o el fancoil de cada zona combata las necesidades térmicas de cada una de ellas individualmente. Sin embargo, el mayor inconveniente es que no se aprovecha el potencial de la instalación al tener parado el suelo radiante en verano y los fancoils en invierno.

Como alternativa se presenta un sistema de fancoil de conductos con suelo radiante que se utiliza tanto para calefacción como para refrigeración, aprovechando las ventajas de ambas unidades terminales mediante la implementación de un sistema de control que permite combinar su uso de forma óptima, teniendo en cuenta la zonificación térmica en el edificio, el control de la temperatura de consigna de la bomba de calor, la selección de la velocidad del ventilador del fancoil y el control de las válvulas hidráulicas para optimizar el funcionamiento de ambos sistemas. Para ello, el sistema se modela en Trnsys17 [8] y se aplica para un caso de estudio residencial en tres ciudades: Madrid, Barcelona y Valencia. Se comparan los resultados de ambos sistemas en términos de confort térmico y consumo de energía.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

La figura 1 muestra el esquema del sistema con los diferentes elementos de control, para el modo refrigeración. El sistema de control consta de dos elementos fundamentales: la central de control de zonificación y la central de control de producción. Ambas disponen de pasarelas de comunicación, que gracias a disponer del protocolo de comunicación con la máquina pueden controlar parámetros del fancoil y la bomba de calor, respectivamente. Las centrales reciben información de los termostatos de cada zona: temperatura de la zona (T_z), temperatura de consigna (T_{setz}) y humedad relativa (HR_z) y a partir de ésta, el algoritmo de control establece el funcionamiento de la instalación con la configuración de los siguientes elementos:

- A nivel de zona, el sistema de control realiza una zonificación térmica del edificio. Como cada zona tiene su propio termostato y su compuerta motorizada (D), cuando la temperatura del aire de la zona está en la banda de confort, se envía una señal de control a la compuerta motorizada de la zona que interrumpe el suministro de aire a la misma. Además, las compuertas se cierran en las zonas que no están ocupadas
- La velocidad del ventilador (F) se selecciona teniendo en cuenta el número de zonas en demanda y el número de zonas totales del edificio. A partir de esa relación, la velocidad del ventilador va secuencialmente siendo cambiada para poder satisfacer los caudales adecuados a cada zona.
- La temperatura de producción de la bomba de calor (TAI) se determina a partir de la unidad terminal que va a predominar en el funcionamiento del sistema combinado. Se establece en $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ para suelo radiante y se modula para fancoil en $TAI_{min}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $TAI_{med}=8$ y $TAI_{max}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta modulación depende de la diferencia de temperatura entre T_z y T_{setz} de cada zona y, a partir de la máxima de ellas (ΔT_{max}), se preselecciona una TAI. Así, si el ΔT_{max} es mayor de

2.5 °C, se activa la T_{Almin} , que se mantiene hasta que la diferencia se reduce a 1.5 °C, que se cambia a T_{Almed} y, finalmente, si baja de 0.5 °C se determina la T_{Almax} . Se realiza una segunda comprobación en función de la velocidad del ventilador. Cuando la mayoría de las zonas está en demanda, el caudal de aire impulsado debe ser alto y la TAI elegida es la T_{Almin} . Cuando el número de zonas en demanda disminuye, la velocidad del ventilador es más baja y la TAI va secuencialmente cambiando a temperaturas más favorables. El sistema elige la TAI que satisface la situación más estricta de las dos.

- Las válvulas de suelo (VS) y/o fancoil (VF) pueden estar abiertas o cerradas en función de la evolución de la temperatura de la zona que priorizan el funcionamiento de uno u otro sistema. La presencia de una válvula de mezcla garantiza que por el suelo radiante circula agua con una temperatura adecuada para evitar la entrada de agua en condiciones que pueda provocar condensación superficial. Los cambios de temperatura del agua de impulsión que se proponen optimizan el funcionamiento conjunto del equipo de producción y la válvula de mezcla.

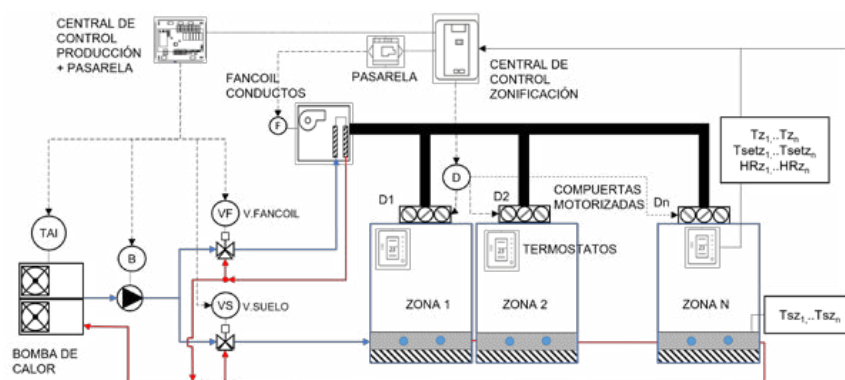


Figura 1. Esquema de un sistema de suelo radiante y fan coil de conductos zonificado mediante control combinado.

Con respecto al sistema de fancoils individuales se trata de una configuración típica de 2 tubos, en la que la bomba de calor impulsa agua fría a los fancoils que realizan el intercambio térmico en cada una de las zonas.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL COMBINADO

El sistema de control actúa a dos niveles: a nivel de zonas con la apertura y cierre de las compuertas y a nivel de sistema, con el funcionamiento de las unidades terminales, la regulación de la velocidad del fancoil y la selección de la TAI de la bomba de calor. A nivel de sistema, en la Fig.2 se muestra el funcionamiento del sistema en modo refrigeración según si actúa solo suelo radiante, solo fancoil o ambos sistemas a la vez.

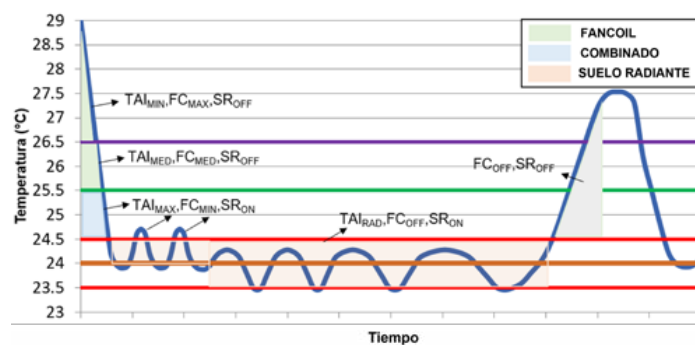


Figura 2. Control combinado de fan coil de conductos y suelo radiante.

Inicialmente, la diferencia de temperatura entre el ambiente y la consigna de confort es muy grande, y se activa la etapa de aire, con la máxima velocidad y la $T_{AI_{min}}$. El objetivo es llevar de forma rápida la temperatura del aire a la zona de confort. Se observa que en función del diferencial de temperatura del aire y la consigna se va modificando la temperatura de producción entre 7 y 10 °C y se va regulando la velocidad del ventilador. A partir de cierto valor de histéresis, que depende de la diferencia de temperatura entre el aire y la consigna, entra en funcionamiento la etapa radiante que, debido a la alta inercia térmica del suelo, se pone en funcionamiento para que alcance el régimen estacionario lo antes posible. A continuación, se desactiva la etapa de aire y se mantiene solo la etapa radiante, ya que se prioriza que sea el suelo el que combata la carga sensible de la zona, con una temperatura de producción constante de 18 °C.

4. RESULTADOS

El objetivo es evaluar la eficiencia de un sistema de control de un fancoil de conductos zonificado, combinado con un suelo radiante, en modo refrigeración, comparado con un sistema de fancoils individuales. La simulación del sistema en Trnsys17, para el caso de estudio de una vivienda, en diferentes condiciones climáticas. Se analizan los resultados en términos de confort térmico y consumo de energía.

4.1. Caso de estudio

Se ha considerado una vivienda típica de un edificio residencial y se ha simulado en las localidades de Madrid, Valencia y Barcelona. La vivienda presenta cinco zonas climatizadas (Salón, cocina, oficina, dormitorio padres y dormitorio niños), con una superficie de 121 m², y el resto se considerará una única zona no acondicionada. Los cerramientos y ventanas de la vivienda se han estipulado según el CTE para cada una de las zonas climáticas. Puesto que en un sistema zonificado no se combate la carga térmica de las zonas en las que no hay ocupación, es importante determinar el perfil de uso de cada estancia. En la fig. 3 se muestra el esquema de la vivienda y el perfil de uso considerado.

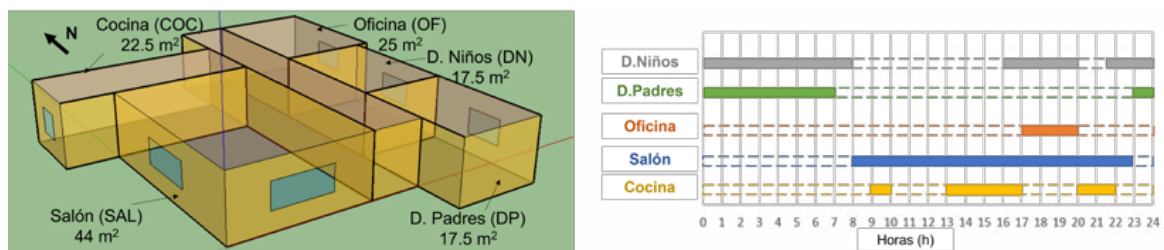


Figura 3. Esquema de la vivienda. Perfil de ocupación.

4.2. Cálculo de cargas. Dimensionado de los equipos

El dimensionado del equipo se realiza teniendo en cuenta que el rango de confort del usuario se establecerá entre 22 y 24 °C. En un sistema zonificado, la red de distribución de aire dispone de compuertas motorizadas que permiten ajustar el aporte térmico del sistema a la demanda de cada zona por separado. De esta forma, la bomba de calor se dimensiona teniendo en cuenta la máxima carga sensible simultánea de las zonas, es decir, para cada paso de tiempo, se suman las cargas de todas las zonas y se considera el máximo anual para refrigeración y calefacción. En el sistema combinado, tal y como se ha descrito, el fancoil se usa como complemento del suelo radiante. Esto supone una menor cantidad de aire de impulsión a las zonas, lo que supone ventajas en relación a un consumo de ventilador más bajo, menos nivel de ruido en las zonas, rejillas de impulsión más pequeñas que posibilitan una mejor integración arquitectónica, o evitar llevar tuberías de agua a cada zona por el falso techo. La tabla 1 muestra las cargas simultáneas obtenidas en cada ciudad, así como la bomba de calor y fancoil de conductos seleccionado (según modelo de fabricante [9]).

Tabla 1. Dimensionado del sistema combinado.

Carga/Equipo	Madrid	Barcelona	Valencia
Carga sensible de refrigeración (W)	4471	4512	4354
Carga total de refrigeración (W)	5215	7267	6242
Bomba de calor	EBLQ07CV3	EBLQ07CV3	EBLQ07CV3
Fancoil de conductos	FWM03D	FWM08D	FWM04D

En el caso que en refrigeración el suelo radiante no actuase, el fancoil de conductos tendría que combatir toda la carga de las zonas y se requeriría un modelo de FWM10D. La bomba de calor seleccionada tiene suficiente capacidad para satisfacer los requisitos del suelo radiante y el fancoil de conductos en las condiciones más desfavorables del año. En relación al dimensionado de los fancoils individuales, se han dimensionado a partir de la carga punta de cada zona.

4.3. Funcionamiento en un día típico de verano

En la fig. 4 se muestra el funcionamiento del sistema de control combinado para un día de verano en Valencia para las zonas de salón y dormitorio niños. Se muestra la evolución de las temperaturas de la zona, temperatura superficial del suelo, temperatura exterior, y TAI.

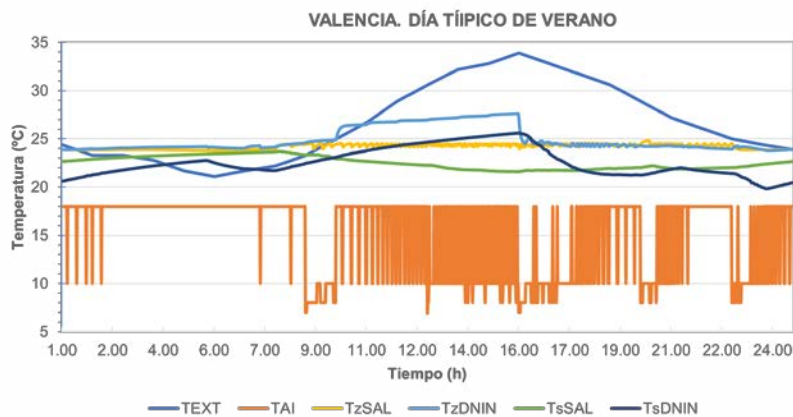


Figura 4. Funcionamiento del sistema para un día de verano en Valencia.

Cabe destacar que el sistema zonificado permite controlar las temperaturas de cada zona sólo en los periodos de ocupación y cuando está en demanda térmica. La zona DNIN está en torno a 24 °C por la noche y en las horas del día con ocupación, el resto de las horas la temperatura evoluciona libremente fuera del confort. También se comprueba que el suelo radiante no es capaz de combatir toda la carga térmica de la zona y el fancoil entra en numerosas ocasiones solo en pequeños periodos de tiempo (2-3 min) para complementar al suelo y mantener las temperaturas en la banda de confort. La capacidad de combatir carga latente del fancoil provoca que la temperatura de rocío del aire de la zona se aleje de la temperatura superficial del suelo, reduciéndose la probabilidad de condensación en el suelo, con temperaturas de suelo superiores a 20 °C.

4.4. Evaluación del confort térmico

Los resultados de confort no se centran exclusivamente en la comparación de la temperatura de la zona, sino que se propone la evaluación del confort según la norma UNE EN ISO 7730: 2006 [10], a partir del cálculo de los parámetros de confort PMV (predicted mean vote) y PPD (predicted percentage dissatisfied). Actualmente, las exigencias de confort en edificios son elevadas y se intenta conseguir que la categoría alcanzada sea la B, que especifica que el

PPD < 10 % y el PMV entre el -0.5 y 0.5, especialmente en edificios de eficientes y sostenibles que obtienen certificaciones de tipo BREEAM o LEED [11]. En la fig. 5 se representa para cada zona, el porcentaje de horas en las que se cumple una categoría mínima de B para ambos sistemas de estudio, en cada una de las ciudades propuestas.



Figura 5. Comparativa del confort térmico.

De forma general se muestra que con ambos sistemas de control se consiguen excelentes resultados de confort térmico, aunque el sistema combinado sí que obtiene, en algunos casos como en la oficina, porcentajes superiores. Cabe destacar que esta zona sólo se activa de 17:00 a 20:00 h, por lo que inicialmente, la carga térmica de refrigeración que tiene que combatir es muy elevada debido al calor acumulado en la zona. Cuando la zona entra en demanda, el suelo radiante se activa, pero va a ser el fancoil el que va a asegurar que en esos instantes iniciales la zona alcance rápidamente la consigna, asegurando así el confort térmico. Por otro lado, el alto porcentaje de tiempo en el que el suelo radiante está operativo mejora las condiciones de la temperatura operativa, frente a los fancoils que influyen en la temperatura seca del aire, dando mejores condiciones de confort al usuario.

4.5. Consumo de energía

Se compara el consumo de energía de ambos sistemas con el objetivo es demostrar que la estrategia de control del sistema combinado es más eficiente. En la figura 6 se muestran los consumos de los ventiladores y de la bomba de calor, para las distintas ciudades estudiadas.

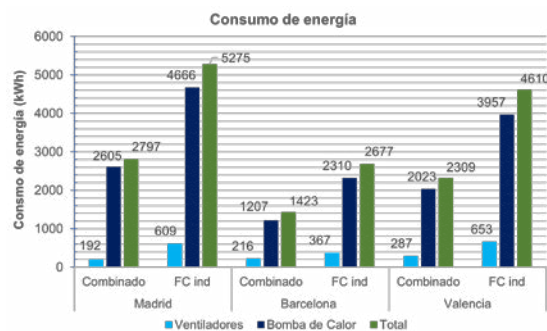


Figura 6. Comparativa del confort térmico.

El consumo de climatización es menor para el sistema combinado, con ahorros del 47-50 %. El gran porcentaje de horas en las que el suelo radiante actúa favorece el rendimiento de la bomba de calor y en el consumo de energía. Además, el consumo de ventiladores de los fancoils individuales es bastante importante con respecto al caso del fancoil de conductos, primero, por tener un fancoil por zona frente a un fancoil para todas las zonas, cuya gestión de la selección es además optimizada en función de las necesidades térmicas del edificio y, segundo, porque la carga que tiene que combatir es mucho menor debido a la actuación constante del suelo radiante.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio analiza el comportamiento del sistema de control de sistemas hidrónicos con aerotermia, aplicado a un sistema combinado de fancoil de conductos zonificado con suelo radiante y se compara con un sistema de fancoil individuales con suelo radiante. Las conclusiones finales del estudio describen las principales ventajas obtenidas en las diferentes comparativas realizadas en materia de confort térmico y consumo de energía eléctrica, para tres ciudades diferentes, en el sector residencial.

El sistema de control combinado permite el uso eficiente de las dos unidades terminales a la vez, según sea calefacción o refrigeración, dando prioridad al suelo radiante y permitiendo la acción del fancoil en los momentos que sea necesario. Además, con el sistema de control por zonas se aseguran mejores porcentajes de confort con respecto al sistema con fancoil individuales.

En términos de consumo de energía, se obtienen ahorros del 47-50% en refrigeración. Esto es debido a que el sistema combinado favorece que el suelo refrescante actúe un gran porcentaje de horas de verano con una producción de agua fría a 18°C, más favorables que para fancoils, lo que supone un funcionamiento de la bomba de calor con rendimientos más favorables y una disminución considerable del consumo de energía eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- [2] Cetin K.S., Fathollahzadeh M.H., Kunwar N., Do H., Tabares-Velasco P.C., Development and validation of an HVAC on/off controller in EnergyPlus for energy simulation of residential and small commercial buildings. *Energy and Buildings*, Vol 183, 2019, pp 467-483.
- [3] ASHRAE Handbook. Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2008.
- [4] UNE-EN 15377. Sistemas de calefacción en los edificios. Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua. Octubre 2008.
- [5] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, A. S. Fung, K. Raahemifar. Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system. *Energy and Buildings*, 141 (2017), pp. 96-113.
- [6] Jaewan Joe, Panagiota Karava. A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings. *Applied Energy* 245 (2019) pp. 65-67.
- [7] Y. Yao, D. K. Shekhar. State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. *Building and Environment*, Vol 200, (2021), pp. 107952.
- [8] Thermal Energy System Specialists. TRaNsient System Simulation Program (TRNSYS), <http://sel.me.wisc.edu/trnsys> (Acceso en marzo 2022).
- [9] Tarifa Daikin 2022. Precios de venta recomendados. Septiembre 2021.
- [10] Norma EN ISO-7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
- [11] BRE, BREEAM offices 2008 assessor manual, BREEAM. Watford: BRE Global Ltd.; 2010.