

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN CONJUNTO DE SUELO RADIANTE Y VENTILOCONVECTORES

ATIENZA MÁRQUEZ, Antonio ⁽¹⁾; CEJUDO LÓPEZ, José Manuel ⁽¹⁾

FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Francisco ⁽¹⁾; DOMÍNGUEZ MUÑOZ, Fernando ⁽¹⁾

jmcejudo@uma.es

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

RESUMEN

Los sistemas de calefacción que utilizan suelos radiantes presentan ventajas frente a los que impulsan aire: mejor distribución espacial de temperatura, mayor rendimiento en la producción y mejor integración. Sin embargo, el suelo tiene una constante de tiempo mayor que otros sistemas que impulsan aire. Esto implica que resultan más difíciles de controlar, y los tiempos de espera hasta alcanzar el confort son mayores que en sistemas de aire. Para evitar estos inconvenientes, en algunos casos, se están acoplando sistemas que impulsan aire a la zona, por ejemplo mediante fancoils, con suelos radiantes.

Cuando esto ocurre, y el sistema de producción es único, se produce agua a la temperatura requerida por el fancoil y, mediante una válvula mezcladora a la entrada del suelo, se reduce ésta hasta la requerida por el suelo. Una solución de este tipo adolece de lo siguiente:

- 1.-No se aprovecha la menor temperatura de producción que el suelo requiere
- 2.-El sistema de control implica una válvula motorizada que regula en función de la temperatura de local.
- 3.-Si el suelo radiante está dimensionado para combatir la carga punta de calefacción, puede prescindirse del funcionamiento del fancoil después de una fase inicial de puesta a régimen.

En el estudio que se propone, se plantean estrategias de control para optimizar la operación conjunta de fancoils y suelos radiantes operando simultáneamente en el suministro de calefacción a una zona. Para alcanzar los objetivos se dispone de un modelo de simulación (planteado en TRNSYS) en el que se han probado los modos de control hasta encontrar la mejor solución. Los criterios de optimización son, además de la reducción del consumo de energía, los tiempos requeridos para alcanzar la temperatura de consigna en la zona y el coste inicial del sistema. El modelo de suelo radiante se ha validado en una instalación experimental.

El trabajo se desarrolla conjuntamente con la empresa ALTRA, que desarrolla sistemas de control para sistemas de climatización.

Palabras clave: Control suelo radiante, control fancoil, sistema combinado para calefacción.

1. Introducción

Los sistemas de calefacción mediante suelo radiante favorecen el confort porque evitan la estratificación y las corrientes de aire. Además requieren del sistema de producción menores temperaturas del agua. Un valor típico puede ser 35 °C con saltos de 5 °C en el suelo. Esto implica mejores rendimientos de producción (COP) y menores pérdidas térmicas en la distribución de la energía desde el sistema de producción hasta las unidades terminales. En [1] se resumen las características de estos sistemas.

Un inconveniente del suelo radiante es la mayor inercia térmica que presenta, comparado con sistemas que utilizan ventiladores para transferir la energía al espacio ocupado, como son los sistemas todo-aire, de expansión directa o fancoils. Esto implica, por una parte, que el tiempo característico es más elevado, tardando más en alcanzarse la temperatura de consigna y, por otra parte, que se complica el control para evitar sobrecalentamientos que incrementarían el desconfort y el consumo.

Una alternativa para mejorar el tiempo de respuesta del sistema de calefacción por suelo es utilizar fancoils. En estos sistemas la producción trabaja enviando agua a 45÷50 °C, retornando con 5 °C de salto. Es claro que la combinación de ambos sistemas, suelo y fancoils, mejora el confort, porque se alcanzan más rápidamente las temperaturas de consigna, y el consumo, cuando es posible combatir la carga sólo con el suelo radiante. Lógicamente, la inversión inicial de un sistema de este tipo será superior al de un sistema único porque se duplican unidades terminales.

El sistema combinado de suelo radiante y fancoil aparece naturalmente cuando la instalación debe funcionar en modo refrigeración, ya que el suelo puede combatir una potencia limitada (aproximadamente 50 W/m²) que se supera en muchos casos. En esas instalaciones el suelo apoya al fancoil, combatiendo este último la carga latente.

En relación al control de la instalación, en los casos de suelo radiante o fancoil por separado, se han estudiado múltiples alternativas. Desde controles convencionales que sólo regulan la temperatura de producción en función de la exterior, a otros más avanzados basados en modelos predictivos que optimizan las variables de actuación (caudales y temperaturas) en función de la demanda y los consumos previstos. La referencia [2] incluye una buena revisión sobre las posibilidades de control optimizado para sistemas de climatización.

En la práctica, la optimización del control exige una capacidad de cálculo y actuadores que incrementan la inversión inicial; en aplicaciones de pequeña y mediana potencia no se justifica el mayor coste. Por ejemplo, un control habitual de suelo radiante es hacer variar la temperatura de entrada del agua mediante una válvula de tres vías mezcladora, y caudal constante por el suelo (Fig. 1). Si el sistema de control pudiera actuar directamente sobre la producción, indicándole qué temperatura del agua es la requerida por el suelo, se evitaría la válvula mezcladora.

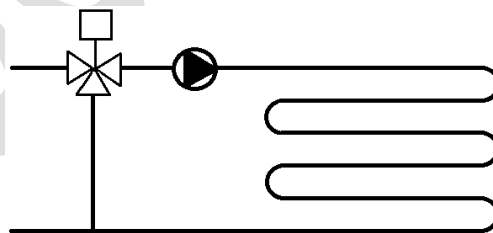


Figura 1: Control de suelo radiante a caudal constante y válvula de tres vías.

Más aún, en los sistemas combinados de suelo radiante y fancoil, no hay una estrategia clara de operación. Quedan por resolver cuestiones como a) qué sistema debe tener prioridad en la operación b) a qué temperatura debe producirse el agua caliente si cada sistema requiere una diferente c) cómo se evita el sobrecalentamiento en la zona cuando operamos con suelo radiante.

Finalmente, en los últimos años han aparecido en el mercado bombas de calor aire-agua para el mercado residencial que combinan la producción de agua caliente para uso sanitario con la calefacción, o la refrigeración. Este artículo contribuye a aclarar la mejor estrategia de operación de sistemas combinados de suelo radiante y fancoils en el modo de calefacción para este tipo de aplicaciones en las que la contención del coste de inversión inicial es prioritaria.

2. Objetivos y metodología

El objetivo del estudio es comparar estrategias de control de sistemas de calefacción que disponen de una producción mediante bomba de calor aire-agua y dos unidades terminales: suelo radiante y fancoils. Ambas se han dimensionado para la potencia punta de la zona, y pueden trabajar de manera independiente o simultánea.

Las restricciones para optimizar el control vienen dadas por la reducción de costes que se impone en el sistema. En concreto son:

- Única temperatura de producción para las dos unidades terminales.
- Caudal de agua constante para cada unidad terminal, aunque pueden diferir entre ellas.
- Actuación de parada o marcha de cada sistema sólo en función de la temperatura de la zona.

El trabajo se ha abordado mediante la simulación con TRNSYS 17 [3] y la calibración parcial de algunos de los modelos utilizados. Para esto se ha dispuesto de la instalación de demostración de que dispone la compañía ALTRA. El esquema de principio de la instalación simulada está en la Fig. 2. Más detalles de la instalación de ensayo se recogen en la sección 2.7.

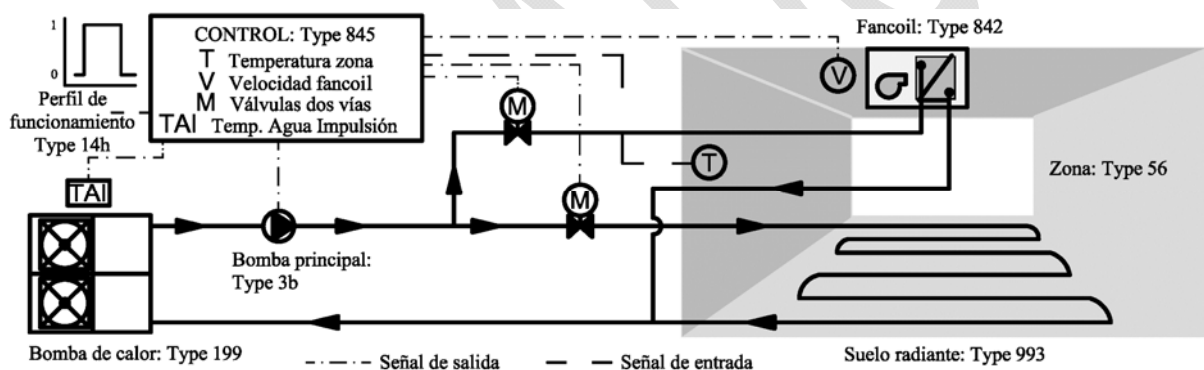


Figura 2: Esquema de principio de la instalación

TRNSYS es software modular de simulación bien conocido. Frente a otros entornos de simulación, permite la definición de componentes (Types) por parte del usuario, que son integrados en el marco general de simulación. En este caso se ha acoplado el sistema con el cálculo de cargas. Este último se realiza con el método de balance mediante el Type 56. En las siguientes secciones se definen los modelos desarrollados específicamente para esta simulación.

Para las simulaciones se ha elegido una zona de 44 m² que representa el salón de una vivienda situada en Málaga (36° 43' N; 4° 25' O), con una carga térmica punta de calefacción de 1,33 kW.

2.1. Modelo de bomba de calor

Se ha desarrollado un modelo de bomba de calor aire-agua a partir de las curvas de comportamiento típicas de estos sistemas. Se calcula la capacidad en función de las condiciones de operación (temperatura exterior y de producción de agua caliente), y el COP de la máquina dependiendo de la fracción de carga (PLR). El valor de capacidad y COP se obtiene interpolando de un fichero de texto. En la Fig. 3 a) se muestra la dependencia del COP con respecto a las temperaturas de evaporador (T_{exterior}) y condensador (TAI). En la Fig.3 b) se muestra la curva de $PLF = \text{COP} / \text{COP}_{\text{nominal}}$ en función del PLR, tomada de [4].

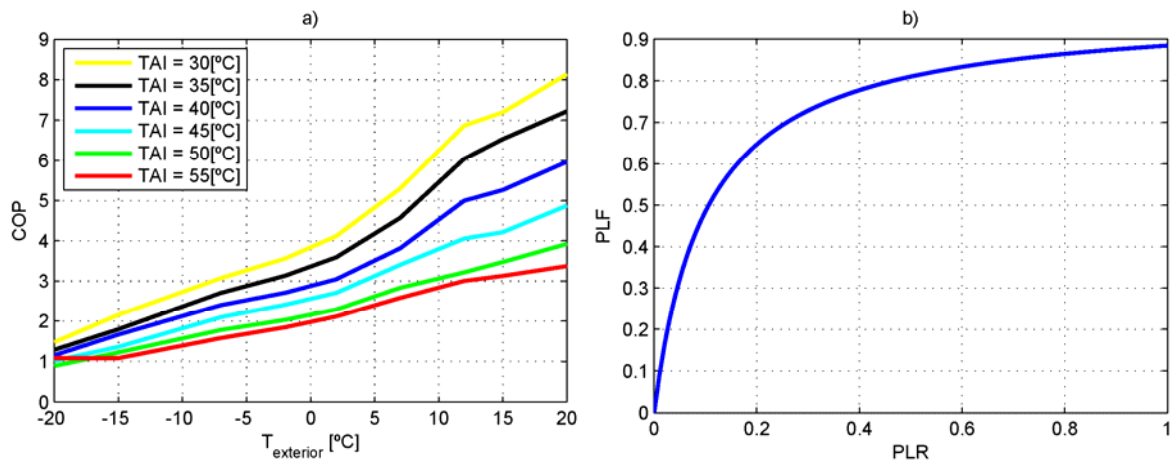


Figura 3: a) COP en función de las temperaturas de evaporación y condensación b) COP/COP_{nominal} en función del PLR

2.2. Modelo de suelo radiante

Como modelo de suelo radiante se ha seleccionado el type 993 [3], que calcula la transferencia de calor por el método de diferencias finitas en tres dimensiones. El dimensionado del suelo se ha llevado a cabo conforme a lo dispuesto en la norma UNE-EN 1264 [5], tomando 5°C como salto térmico de diseño y un caudal de 5,2 L/h·m². El suelo está compuesto por 54 tubos en serpentín de polietileno reticulado (conductividad 0,35 W/m·K) de diámetros 16/12 mm. La longitud total de tubos es de 291,6 m separados en dos circuitos. Los espesores y propiedades térmicas del mortero y el acabado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de la capa de mortero y acabado superficial.

	Espesor [cm]	Conductividad [W/m·K]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kg·K]
Mortero	4,5	0,34	2000	1000
Parquet	1,5	0,01	550	800

2.3. Modelo de fancoil

El modelado del fancoil supone efectividad constante (ϵ) para cada velocidad. Su valor se obtiene del catálogo del fabricante. Como la transferencia de calor la controla el aire, se puede asumir una efectividad constante para cada caudal de aire (\dot{m}_{aire}), aunque el caudal de agua no sea constante. La temperatura de aire de impulsión (t_s) y de agua a la salida de la batería (t_{w2}) se calcula según:

$$t_s = t_r + \epsilon \cdot \frac{\overbrace{\min(\dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}}, \dot{m}_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua}}}) \cdot (t_{w1} - t_r)}^{q_{\text{máx}}}}{\dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}}}, \quad t_{w2} = t_{w1} - \epsilon \cdot \frac{q_{\text{máx}}}{\dot{m}_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua}}}}$$

Donde t_r y t_{w1} son las temperaturas del local y del agua a la entrada de la batería respectivamente. La carga sensible que combate el fancoil (q_{rs}) se calcula como $q_{rs} = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot (t_s - t_r)$. El modelo de fancoil utilizado en las distintas simulaciones será de tres velocidades, cada una de ellas con un consumo de ventilador asociado obtenido de los datos del fabricante.

2.4. Control del suelo radiante

El suelo radiante se controla a partir de la temperatura de la zona y del incremento de ésta entre dos instantes de tiempo, definidos como el paso de simulación (5 minutos, impuesto por los tiempos de apertura y cierre típicos de válvulas de dos vías). Si la temperatura de la zona es inferior a 19 °C, la válvula de dos vías que controla el suelo está siempre abierta. Cuando se supera este valor, seguirá en funcionamiento siempre que el incremento de temperatura de la zona no supere 0,5 °C en el paso de

tiempo. Una vez superado $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ el sistema se detiene y no podrá volver a activarse hasta llegar a $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se volvería a poner en marcha con la estrategia descrita anteriormente. El sistema de producción trabaja impulsando agua a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.5. Control del fancoil

Para el fancoil se ha utilizado un control simple con histéresis como el representado en la Fig. 4. El sistema de producción trabaja impulsando agua a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

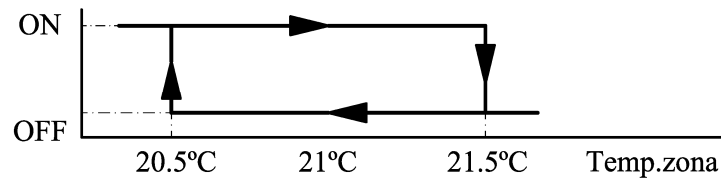


Figura 4: Control del fancoil

2.6. Control del sistema combinado

El control del sistema combinado toma decisiones con un algoritmo basado en la temperatura de la zona: si ésta es inferior a $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sólo funcionará el fancoil con la velocidad media, agua a 45°C y con el caudal que requiera el fancoil. Superados los $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por debajo de $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se abrirá la válvula del suelo (ver Fig. 2), de forma que ambas unidades terminales estarán habilitadas simultáneamente. En este caso la producción de agua se fijará en $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el caudal que moverá la bomba principal será el correspondiente al suelo radiante, distribuyéndose a cada unidad terminal en función de la fracción sobre la suma de caudales de suelo y fancoil independientemente. Una vez superados los $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se cierra la válvula del fancoil, la producción de agua baja a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el suelo asumirá la responsabilidad de combatir la carga térmica de la zona. En este caso, el caudal de agua será el estipulado para el suelo en su dimensionado. En caso de superarse $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se cerrará la válvula del suelo, y ésta no volvería a abrirse hasta registrarse una temperatura de zona inferior a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.7. Instalación experimental

Para la calibración de los modelos utilizados en la simulación se dispone de una planta experimental. Está equipada con una bomba de calor Daikin Altherma ERLQ004CV3 que da servicio a dos zonas, cada una de ellas de $4,5\text{ m}^2$. En las zonas se dispone de suelo radiante (en diferentes configuraciones) y fancoil de suelo o conductos. Hasta el momento se ha validado el modelo de suelo mediante sondas de temperatura superficial y cámara termográfica que demuestra la no uniformidad de la temperatura del suelo (ver Fig. 5).

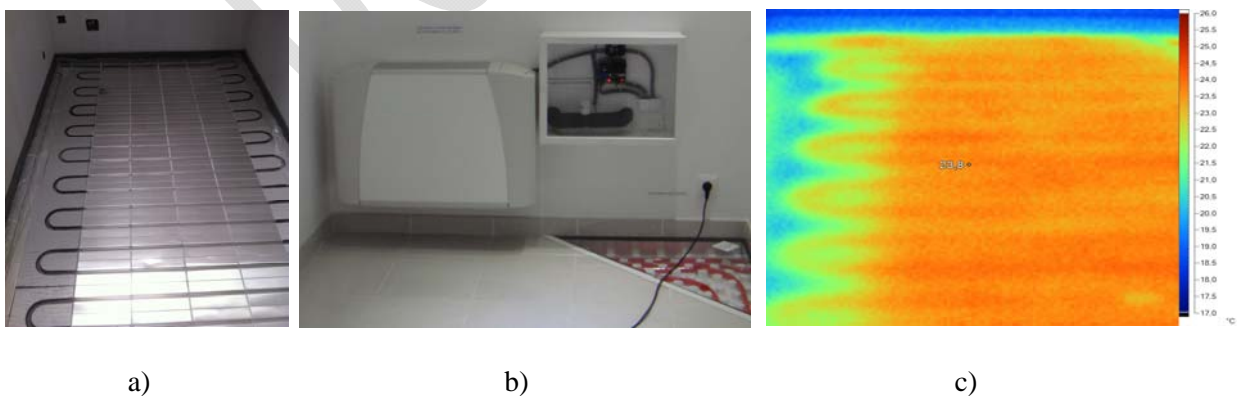


Figura 5: a) Suelo radiante de la planta experimental b) fancoil y c) termografía

3. Resultados de la simulación

Las simulaciones se han llevado a cabo bajo un perfil de ocupación comprendido entre las 8:00 y las 22:00 para cada uno de los días del periodo oficial de invierno (diciembre-febrero, según UNE 100-014-84 [6]). En periodos de no ocupación no se combate la carga térmica de la zona. El fichero de datos climáticos para Málaga se ha obtenido de [7].

3.1. Sistema de suelo radiante

En la Fig. 6 se muestran los resultados de temperatura de la zona, temperaturas del suelo y señal de control para un día de invierno (13 de enero). Véase que para alcanzar el confort cuando se ocupa la zona, habría que arrancar el suelo antes. A lo largo del periodo de simulación el valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo oscila entre 2,5 y 3 W/m²·K y el convectivo radiante entre 8,5 y 11 W/m²·K. Los consumos se muestran en la sección 3.4.

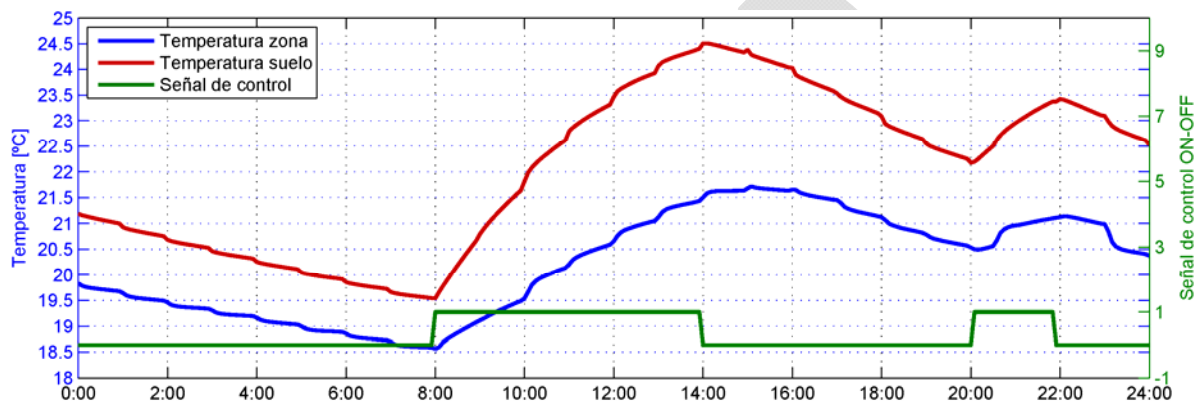


Figura 6: Evolución de temperaturas de zona y suelo para el 13 de enero.

Se observa el tiempo de respuesta de la zona una vez que el suelo se activa, requiriéndose algo menos de tres horas hasta alcanzar una temperatura dentro del rango de confort (20,5 ÷ 21,5 °C)

3.2. Sistema de fancoil

En la Fig.7 se muestra la evolución de la temperatura de la zona con dos fancoils diferentes aplicando el control descrito en la sección 2.5. En el caso a) el fancoil cuenta con una potencia de 2,4 kW, provoca 3,3 ren/h y precisa de 210 L/h de agua; en el caso b) la potencia del fancoil es de 1,5 kW y requiere 130 L/h de agua. Aunque se ajusta a la carga punta de la zona, sólo proporciona 2,2 ren/h. De la Fig. 7 se desprende que para alcanzar la consigna de la zona de forma rápida no sería suficiente con dimensionar el fancoil de acuerdo con la carga punta. En el caso b) se tarda aproximadamente 4 horas en alcanzar la consigna, más incluso de lo que se tardaría con el suelo radiante (Fig. 6).

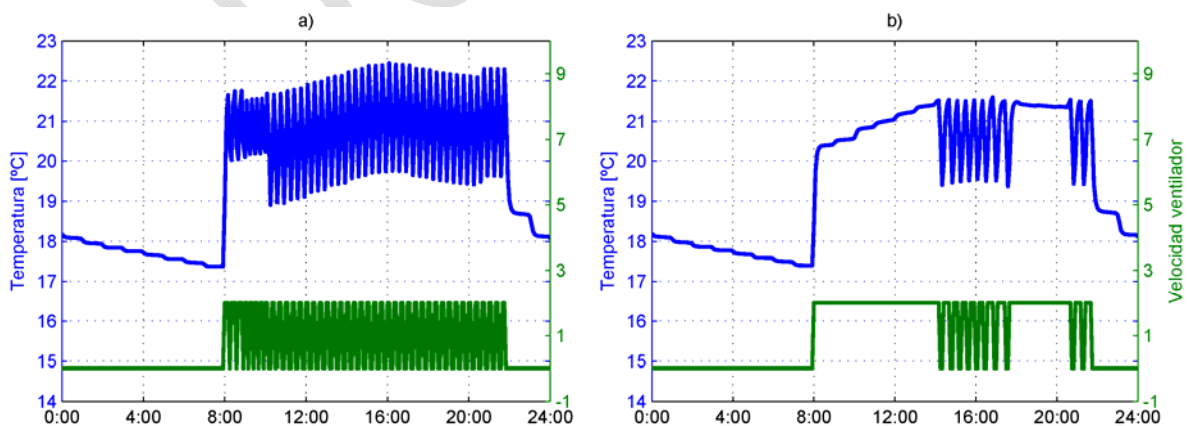


Figura 7: Evolución de la temperatura de la zona a) fancoil de 360 m³/h y b) fancoil de 240 m³/h.

En la situación a) los tiempos de paro-marcha son de aproximadamente 10-15 minutos, valor típico en las instalaciones reales. En la sección 3.4. se muestran los resultados de consumo.

3.3. Sistema combinado

Para el sistema combinado se utiliza el fancoil correspondiente al caso a) de la Fig. 7. Los resultados obtenidos para el sistema combinado aplicando el control descrito en la sección 2.6. se muestran en la Fig. 8. Se comprueba que se consigue llegar a la región de confort comprendida entre 20,5 °C y 21,5°C con mayor rapidez que cuando actúa únicamente el suelo. Se muestran datos de consumos en la sección 3.4.

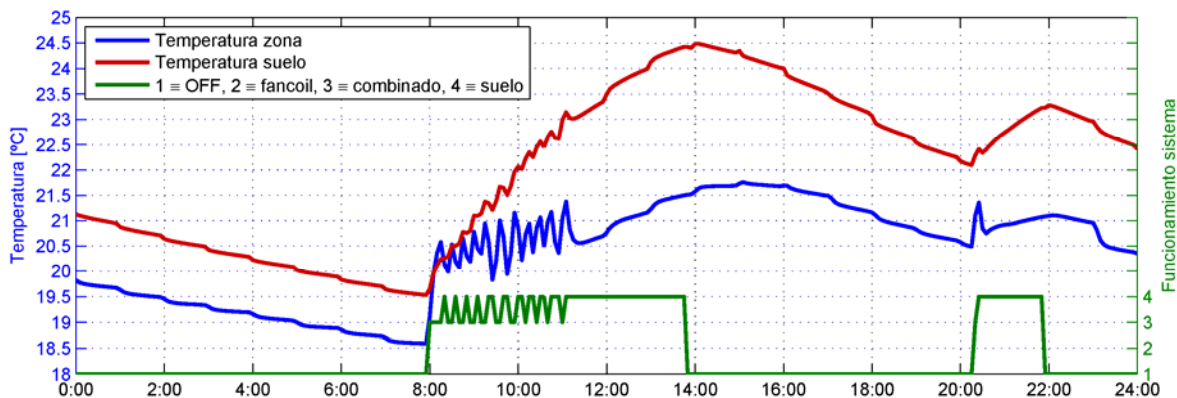


Figura 8: Evolución horaria de temperaturas de zona y suelo para el 13 de enero

3.4. Comparación resultados

En la tabla 2 se muestra la comparación de los principales resultados obtenidos para las simulaciones en el periodo de invierno en los tres casos: suelo, fancoil y sistema combinado. En el caso de fancoil se ha estudiado la unidad terminal correspondiente al caso b) de la Fig.7.

Tabla 2: Resultados obtenidos para simulación diciembre-enero-febrero.

	Suelo Radiante	Fancoil	Sistema combinado
Consumo eléctrico bomba de calor [kWh]	344	417	384
Consumo ventiladores [kWh]	-	36	4
Consumo eléctrico total [kWh]	344	453	388
PLR medio	0,68	0,58	0,75
COP medio	4,9	3,4	4,6
Temperatura media (con ocupación) [°C]	20,2	21,1	20,8

Como era de esperar el COP medio del fancoil es menor (1,4 veces) el del suelo radiante, ya que los valores de COP son mayores con temperaturas de producción de agua más bajas. Además, al trabajar el fancoil en fracciones de carga menores, su COP se ve penalizado en mayor medida que el del suelo (Fig. 3 b)). Estos factores contribuyen a que el consumo total del sistema con fancoil sea un 31.6 % mayor que en el caso de sólo suelo. Por otra parte, el sistema combinado consume un 13 % más que el suelo pero un 14,3 % menos que el fancoil individual. Además se reduce el consumo en ventiladores un 12 % con respecto al fancoil individual.

La temperatura media de la zona en los periodos de ocupación es menor en el suelo radiante por el alto tiempo característico de esta unidad terminal. Sin embargo, la temperatura media en todo el periodo de invierno sería de 20,6 °C para el suelo, mientras que en el caso de sólo fancoil es de 19,6 °C, y 20,7 °C

en el combinado. La inercia térmica del suelo hace que éste ceda calor a la zona aunque no se requiera por ser un periodo sin ocupación.

Recuérdese que para la comparación de consumo únicamente se ha tenido en cuenta el periodo en el que se permite operar a los sistemas dejando a un lado el confort.

4. Conclusiones

Se presenta la fase inicial del estudio de optimización del control de sistemas de suelo radiante y fancoil realizado en TRNSYS. Se comprueba que, aunque los consumos calculados cuando se utiliza el suelo radiante son menores, la respuesta es lenta y se tienen horas de ocupación sin confort. El hecho de que los fancoils puedan suplir esta debilidad hace que el sistema combinado tenga interés en sistemas hidráulicos de climatización.

El control del suelo radiante mantiene la temperatura de confort sin necesidad de un control sobre el gradiente de temperatura de la zona en el paso de tiempo de simulación.

En el dimensionamiento de fancoils es importante atender al caudal de aire que pueden proporcionar, ya que el número de renovaciones-hora de aire condiciona en la rapidez con la que el sistema alcanza la consigna de la zona.

Finalmente, el sistema combinado ofrece una forma de llegar rápidamente a rangos de confort con consumos menores que cuando se utiliza sólo fancoil. La posibilidad de instalar un fancoil de menor potencia en el sistema combinado también respalda el uso de este tipo de sistemas.

El estudio tendrá continuación buscando mejoras de control y se analizará el impacto que tiene sobre la comparación de consumos el hecho de activar el suelo horas antes de que comience la ocupación para poder cumplir los valores de consigna justo cuando se ocupa la zona por primera vez en el día. Una vez simulados los algoritmos de control mejorados se hará uso de la planta experimental para completar la calibración de los modelos.

5. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado financiado por la Corporación ALTRA.

6. Referencias

- [1] CEJUDO LÓPEZ, J. M. DOMÍNGUEZ MUÑOZ, F. CARRILLO ANDRÉS, A. GALLARDO SALAZAR, M. *DTIE 9.05 Sistemas de Climatización*. Madrid: ATECYR, 2010. 98 p.
- [2] HAMEED SHAIKH, P. BIN MOHD NOR, N. NALLAGOWNDEN, P. ELAMVAZUTHI, I. IBRAHIM, T. *A review on optimized control systems for building energy and confort management of smart sustainable buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 34, pp. 409-429.
- [3] TRNSYS 17. www.trnsys.com [Consulta: 24 marzo 2015]
- [4] BETTANINI, E. GASTALDELLO, A. SCHIBUOLA, L. *Simplified models to simulate part load performances of air conditioning equipments*. En Proceedings de *Eight International IBPSA Conference*, Eindhoven, 2003. pp. 107-114
- [5] UNE-EN 1264-2012. Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies.
- [6] UNE 100-014-84. Climatización, bases para el proyecto. Condiciones exteriores de cálculo.
- [7] Ficheros climáticos EnergyPlus <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [Consulta: 27 marzo 2015]