



**Desarrollo de un modelo de soporte al
dimensionamiento de instalaciones geotérmicas y de
cimentación termoactiva para la climatización de
viviendas**

Autor: Pablo de la Rosa Tudela

Institución: Instituto Andaluz de Tecnología (IAT)

Otros autores: Javier Morales García (IAT); Juan Pablo Jiménez Navarro (IAT); Iñigo Urra Mardaraz (TECNALIA)

Resumen

La eficiencia energética en la edificación, así como las energías renovables, están actualmente experimentando un importante crecimiento dado el alto nivel de consumo energético de los edificios residenciales en su etapa de uso, estando por ello fuertemente apoyadas por las distintas administraciones, tanto a nivel regional como nacional e internacional. La energía geotérmica de baja entalpía se encuentra en plena expansión como fuente de intercambio energético para la climatización y la obtención de ACS en viviendas. Sin embargo, aunque existen algunas recomendaciones para el dimensionamiento de estas instalaciones, hoy en día se carece de una herramienta de uso común que reúna dichas propuestas de una manera útil y fácilmente accesible por el usuario.

Con el fin de cubrir esta necesidad, en el marco de realización del proyecto de I+D GEOCIM (Cimentación termoactiva. Integración geotermia en estructura de los edificios para su aprovechamiento en aplicaciones de climatización), financiado por el programa nacional INNPACTO 2011, se ha desarrollado un modelo que pretende facilitar dicho dimensionamiento. Dadas las similitudes entre la geotermia convencional y la cimentación termoactiva, este modelo contempla ambos sistemas y permite ejecutar simulaciones de estas instalaciones.

El modelo, desarrollado mediante el software TRNSYS, abarca el intercambio energético con el suelo mediante intercambiador vertical, el funcionamiento de la bomba de calor y la demanda energética del edificio residencial bajo estudio.

En la comunicación se expondrán los detalles del desarrollo del modelo, el cual ha sido evaluado mediante los resultados obtenidos de la monitorización de una instalación de geotermia convencional actualmente en funcionamiento. Una vez comprobada la validez del modelo desarrollado, se han llevado a cabo simulaciones para la misma instalación considerando la cimentación termoactiva, así como una comparación de viabilidad técnico-económica en base a los resultados obtenidos en ambos casos.

Palabras clave: geotermia, climatización, cimentación termoactiva, bombas de calor, TRNSYS

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, pese al alto potencial existente, el nivel de uso de la tecnología geotérmica en España es muy bajo, lo que da lugar a que se sitúe en una posición retrasada en cuanto a nivel de implementación de la tecnología respecto a otros países europeos, como Suecia, Alemania, Suiza o Austria, donde se ha desarrollado un conocimiento sobre la explotación de los recursos geotérmicos de acuerdo a sus necesidades y condiciones climáticas.

A este retraso en el desarrollo de la tecnología, se debe añadir las características especiales del clima en España (muy frío invierno y muy cálido en verano a lo largo de la geografía nacional), así como una temperatura del subsuelo tal mejora la eficiencia y el rendimiento de estas instalaciones en comparación con otros países. Por tanto, se puede determinar que la principal barrera para la implementación masiva de esta tecnología es la económica.

De acuerdo con lo anterior, para alcanzar este nivel de implementación, hay que llegar a superar una serie de desafíos tecnológicos que permitan mejorar la eficiencia de estas instalaciones y reducir los costes de instalación. Una alternativa para reducir estos costes es la de integración del conjunto de tubos captadores del sistema geotérmico en los elementos estructurales de la propia cimentación del edificio o vivienda en el que se quiera instalar el sistema geotérmico, ya sea para ACS o para integrarlo con el sistema de climatización. Así, en este tipo de configuración, los costes de perforación quedan sufragados por los derivados de la propia cimentación del edificio. Esto es lo que se conoce como cimentación termoactiva. En este tipo de sistemas, además de las consideraciones térmicas, se deben tener en cuenta las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de modo que en ningún momento se ponga en peligro la integridad de las mismas y se garantice su resistencia y durabilidad con el tiempo.

A pesar del gran potencial de reducción en términos de inversión que supone la implementación de sistemas de cimentación termoactiva, en la actualidad, aunque existen algunas recomendaciones para el dimensionado, no se dispone de una metodología de cálculo y diseño estandarizada para este tipo de tecnología, por lo que las pocas instalaciones que se acometen actualmente en España se hacen de manera sobredimensionada, provocando con ello que el periodo de amortización no sea el óptimo.

Ante esta situación, uno de los desafíos establecidos dentro del proyecto GEOCIM, *Cimentación termoactiva. Integración geotermia en estructura de los edificios para su aprovechamiento en aplicaciones de climatización* (IPT-2011-1790-920000, convocatoria INNPACTO 2011), ha sido el desarrollo de una herramienta que ayude al dimensionamiento de este tipo de instalaciones y dadas las similitudes, de geotermia convencional también, con el fin de optimizar el diseño de las mismas a las necesidades reales de demanda energética.

2. ALCANCE DEL PROYECTO GEOCIM

El objetivo principal del proyecto GEOCIM es generar un conocimiento avanzado que permita superar las principales barreras tecnológicas asociadas con la explotación del intercambio térmico de baja temperatura con el suelo para su integración con el sistema de climatización de los edificios mediante cimentación termoactiva.

Para conseguir este objetivo dentro del proyecto GEOCIM ha sido necesario investigar sobre el diseño óptimo de este tipo de cimentaciones, (sobre todo desde un punto de vista de intercambio energético), se han estudiado diferentes composiciones de hormigones, tubos de captación, sondas geotérmicas y fluidos caloportadores, analizando de las diferentes opciones que existen en el mercado e identificando cuál es la combinación de las mismas que maximiza el intercambio térmico con el suelo, se ha llevado a cabo un estudio del estado del arte de la tecnología de bombas de calor, y además se ha caracterizado la diferente tipología de suelo a lo largo de la geografía nacional determinando su conductividad térmica. Con todo este trabajo previo, y junto con los resultados de las instalaciones de ensayo llevadas a cabo (tanto de pilotes como de pantallas termoactivadas, dos elementos estructurales para la cimentación de edificios), se ha desarrollado la herramienta de dimensionamiento de instalaciones de cimentaciones termoactivas, y, como se ha comentado, por similitud de instalaciones, de geotermia convencional.

Esta solución permitirá a los agentes del sector de la climatización diseñar de forma óptima este tipo de instalaciones, respetando en mayor medida el medioambiente en comparación con una instalación convencional de bombas de calor, y sobre todo, haciéndolas mucho más independientes desde un punto de vista energético.

Además de todo esto, y como valor añadido del proyecto, en base a la Directiva Europea 2009/28/CE, se considera, bajo ciertas condiciones, como energía renovable la contribución de la energía proporcionada por las bombas de calor. Para esta consideración, esta Directiva en su Anexo VII muestra bajo qué parámetros de funcionamiento, tipo de tecnología, zona climática y rendimiento estacional, se puede considerar la contribución de la bomba de calor como energía renovable. Por lo tanto, se puede establecer que la tecnología de bomba de calor integrada con geotermia es una energía limpia y eficiente, con un alto potencial de implementación en el país durante los próximos años como parte integrada dentro del sistema de climatización de los edificios.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Como se ha mencionado con anterioridad, la herramienta desarrollada pretende servir de apoyo en el dimensionamiento de instalaciones de geotermia de baja entalpía para sistemas de climatización y ACS. Con el fin de poder evaluar los parámetros más importantes que intervienen, ha sido necesario modelar el sistema de climatización en su conjunto, y dentro del mismo, dada la variabilidad de su composición y la inexistencia de normativa al respecto, se ha prestado especial atención a la parte del sistema correspondiente al intercambiador geotérmico.

La herramienta desarrollada permite editar ciertos parámetros críticos del modelo de modo que el usuario pueda ajustar la simulación a su caso de estudio; es decir, son parámetros editables como las características del intercambiador en la unidad terminal, potencia de calefacción/refrigeración y potencia nominal de la bomba de calor, consigna en la entrada y salida de las unidades terminales de climatización. En función del sistema de climatización que se elija, los resultados que se obtengan pueden servir de comparativa entre distintos sistemas o distintas configuraciones de un mismo sistema.

En general, los sistemas de climatización basados en geotermia cuentan con una bomba de calor reversible agua-agua que trabaja de dos modos distintos, según se requiera calor o frío en la vivienda. De este modo, durante los meses de invierno, el intercambiador geotérmico absorberá energía del suelo y, mediante la bomba de calor y otros elementos, proporcionará el calor necesario en la zona climatizada para cubrir la demanda. De manera inversa, durante los meses de verano, el calor de las estancias será absorbido y conducido a través del mismo sistema hacia el intercambiador geotérmico, donde se disipará en el suelo.

El modelo se ha realizado mediante el software TRNSYS 17, utilizando los *types* disponibles en las librerías para llevar a cabo todo este intercambio de energía entre la fuente y la zona habitable. El esquema de los componentes utilizados puede observarse en la siguiente figura, mientras que una descripción de los principales elementos se expone a continuación.

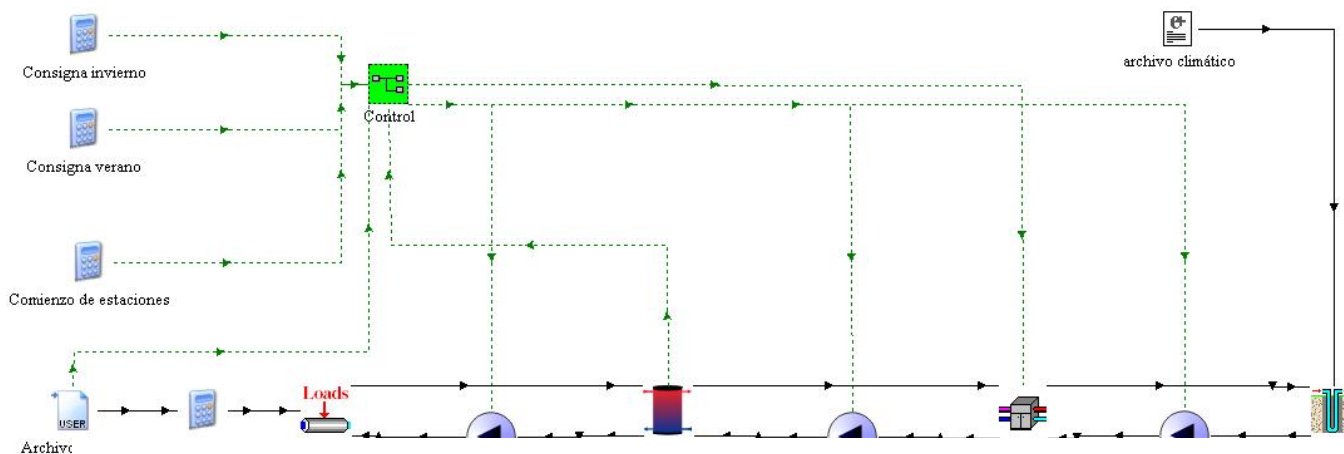


Figura 1. Esquema del modelo de climatización basado en geotermia

Figura 1. Esquema de componentes modelo TRNSYS

3.1. Intercambiador geotérmico (GHE)

Este bloque modela un campo de sondas geotérmicas verticales con una disposición de los tubos en forma de 'U'. Ésta será la parte de la fuente del sistema; es decir, de donde se extraiga o se inyecte la energía térmica necesaria en el sistema.

Es configurable mediante una serie de parámetros de diseño, entre los que destacan:

- Parámetros de la configuración de las sondas: profundidad, número de perforaciones, perforaciones en serie, radio, número de tubos, radio exterior e interior de los tubos.
- Características térmicas del intercambiador: conductividad de las tuberías, densidad y calor específico del fluido, conductividad del relleno.
- Parámetros del terreno: volumen de almacenamiento, conductividad térmica, capacidad calorífica.

Estos parámetros pueden adaptarse de tal manera que el mismo modelo sea válido tanto para perforaciones en el suelo como para sistemas de cimentación termoactiva, ya que la principal diferencia entre ambos tipos de sistemas radica en el tipo de relleno.

3.2. Bomba de calor

Como es habitual en este tipo de sistemas, se ha utilizado una bomba de calor agua-agua que conecta el intercambiador geotérmico con el depósito de acumulación.

En este caso se pueden modificar los siguientes parámetros:

- Densidad y calor específico de los fluidos, tanto en el lado de la carga como en el lado de la fuente.
- Potencia calorífica, frigorífica y consumo eléctrico nominales.
- Curvas de comportamiento.

El funcionamiento en modo frío o calor vendrá establecido por el inicio de la temporada de calefacción o refrigeración según lo indique el usuario. De esta manera, se consigue una mejor adaptación a las condiciones climáticas de la zona en la que se situaría la instalación. En cuanto a las curvas de comportamiento, existen 4 tipos de curvas en función de la potencia nominal de la bomba de calor.

3.3. Depósito de acumulación

Se trata de un depósito de agua que se calienta o se enfría, según se trate de calefacción o refrigeración, mediante la bomba de calor. Con este depósito se consigue que la bomba de calor tenga un funcionamiento más continuo y no tan dependiente de los requerimientos instantáneos de la demanda, reduciendo el número de encendidos-apagados y evitando un control más exhaustivo de la bomba de calor.

Parámetros modificables:

- Dimensiones del tanque: volumen, altura.
- Características del fluido: densidad, conductividad, calor específico, viscosidad.

La temperatura de este tanque será la variable de supervisión para establecer el control del funcionamiento de la bomba de calor. Esta temperatura vendrá dada por el usuario mediante dos consignas, una para la temporada de calefacción y otra para la de refrigeración.

3.4. Cargas

Las cargas han sido modeladas como una extracción (o aportación) de calor a un flujo de agua. De esta manera se consigue una generalización del sistema que sea válido para cualquier tecnología instalada en climatización (suelo radiante, calefactores, fan-coils, split, etc) sin que se produzca una importante pérdida de realismo en el modelado. Estas cargas son leídas de un archivo que recoge las demandas horarias durante el periodo establecido para la simulación. Además, este bloque indica la cantidad de energía auxiliar que habría que aportar para obtener las condiciones deseadas, en el caso de que esas condiciones no pudiesen alcanzarse únicamente mediante el sistema geotérmico.

3.5. Bombas de impulsión

Se ha utilizado un sencillo modelo para este tipo de elemento, puesto que se pretende controlar únicamente el paso de fluido en cada uno de los bucles.

Los parámetros para estos bloques son:

- Potencia nominal de la bomba.
- Características del fluido: calor específico y flujo máximo permitido.

El control de la bomba de impulsión para el bucle de las cargas se hará mediante una consigna ON/OFF en función de la existencia o no de demanda en un determinado momento. El funcionamiento de las bombas de impulsión a ambos lados de la bomba de calor vendrá establecido también por un control ON/OFF en función de la consigna de temperatura establecidas para el depósito de acumulación.

4. CASO DE ESTUDIO: AEROPUERTO DE REUS

Con el fin de poder validar el modelo desarrollado y determinar que parámetros, en función de su influencia en los resultados, son susceptibles de ser modificados por el usuario de la herramienta, se ha procedido a comparar los resultados ofrecidos para un caso real de instalación de geotermia convencional localizada en el aeropuerto de Reus.

Esta instalación, localizada en el edificio de Servicio de Extinción de Incendios del aeropuerto de Reus, consiste en un sistema de generación de frío y calor centralizado mediante bomba de calor de tipo agua-agua conectada a un intercambiador geotérmico de baja temperatura y disposición vertical. El sistema de intercambio está compuesto por 4 perforaciones de 105 metros lineales de profundidad cada una y 150 mm de diámetro, separadas entre sí 8 metros. Las sondas geométricas introducidas en cada perforación son de polietileno no reticulado de alta densidad tipo PE-100 SDR 11 PN 16, de 32 mm de diámetro y 3,7 mm de espesor, con pie de sonda en forma de U, siendo el relleno anular de la perforación con cemento-bentonita de alta conductividad.

Por su parte, la bomba de calor agua-agua es el modelo geoTHERM VWS 300/2 de Vaillant, que presenta una potencia térmica nominal de 33,6 kW en calor, con un COP de 5,01 y potencia frigorífica de 26,9 kW en refrigeración (según la EN 14511 para unas

condiciones nominales de B5W35) y un COP de 3,1 para unas condiciones de funcionamiento de B0°C/W 55°C. El agua para la climatización es almacenada en un depósito de acumulación de inercia de 600 litros de capacidad, modelo Geiser inercia G-600-I del fabricante Lapesa, fabricado en acero al carbono, aislado térmicamente con espuma rígida de poliuretano inyectado en molde, libre de CFC y acabado en forro acolchado desmontable.

El sistema de elementos terminales está compuesto por fancoils con batería de agua fría/calor dimensionados para trabajar a una temperatura de impulsión del agua de calefacción a 40 °C con objeto de que la bomba de calor geotérmica trabaje a menores temperaturas en el condensador y de esta forma, se optimice el COP de la máquina.

En cuanto a la demanda a la que hacer frente, el edificio presenta una demanda de potencia máxima de 24,4 kW y de 23,1 kW en calefacción y refrigeración respectivamente, siendo la distribución mensual de demanda tal y como se recoge en la figura 2.

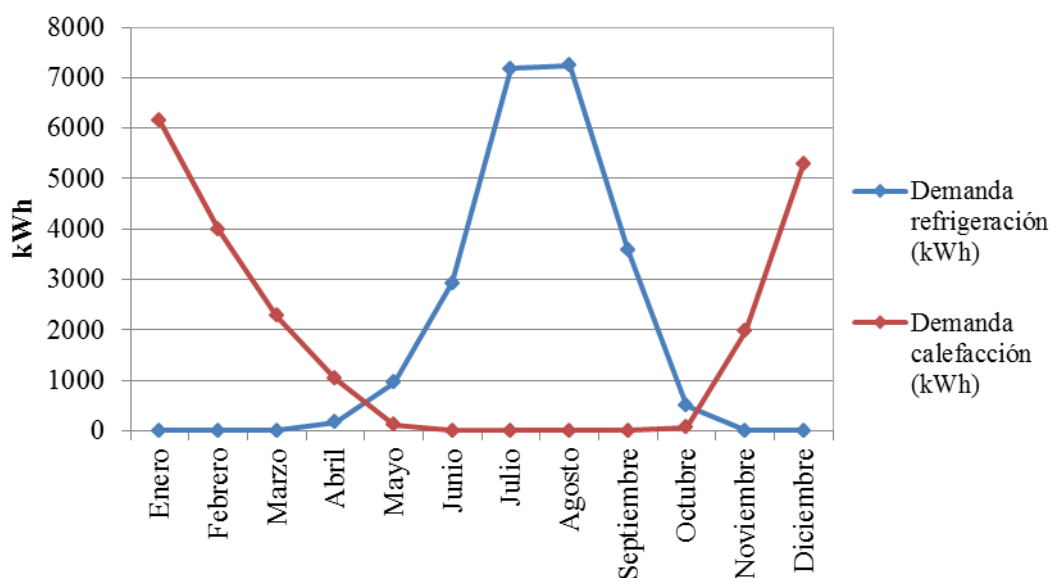


Figura 2. Demanda mensual agregada de calefacción y refrigeración

Dado que para poder determinar con mayor exactitud el grado de adecuación del modelo a la realidad los cálculos se han realizado de forma horaria, se estableció como referencia de la demanda las temperaturas entrada y salida de los fancoils, ya que éstas dependen de la consigna establecida en cada momento.

Por otro lado, las características térmicas del subsuelo han sido obtenidas del Ensayo de Respuesta Térmica del Terreno, llevado a cabo en un sondeo piloto in situ, de 100 m de profundidad, con sonda doble de DN32, que ha dado como resultado una conductividad térmica de 2,30 W/mK.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Un vez caracterizada la instalación, y con el fin de simular la misma con el mayor grado de exactitud posible, se ha procedido a implementar en el modelo los mismos parámetros geométricos de la perforación y las características del equipamiento utilizado.

La bondad del modelo se determinará mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los datos recogidos mediante un sistema de adquisición de datos ya instalado. La lectura de los datos se inicia el 3 de marzo de 2014 a las 14:10 y finaliza el 8 del mismo mes a las 12:40.

Los parámetros a comparar son la temperatura de entrada y salida en el intercambiador geotérmico (terreno), la temperatura de salida y retorno en el depósito por el lado de la carga (con esto se pretende estudiar el ajuste a la demanda en cada instante), el calor entregado por la bomba de calor, la potencia consumida por la bomba de calor y el calor absorbido por el terreno.

Analizando de forma previa los datos registrados, cabe destacar la evolución natural que experimentan las temperaturas de los flujos en horario nocturno, cuando no hay demanda y la instalación está en reposo. En la figura 3, se observa el caudal y la potencia entregada por la bomba de calor, indicando cuándo está en funcionamiento. Como puede observarse, casi en el mismo instante y debido al enfriamiento sufrido por el depósito, la bomba de calor se activa de forma puntual con el fin de mantener al depósito dentro del rango de temperaturas establecido. Esta cuestión provoca, como puede observarse en la figura 4 de evolución de temperaturas del fluido caloportador en el terreno, una alteración tanto en el circuito de entrada como de salida del mismo. En esta ocasión los sensores están situados en diferente ubicación, estando el de medición de salida del terreno (T_{out}) instalado a la intemperie en el mismo terreno y el de entrada (T_{int}) en la sala a la salida de la bomba de calor.

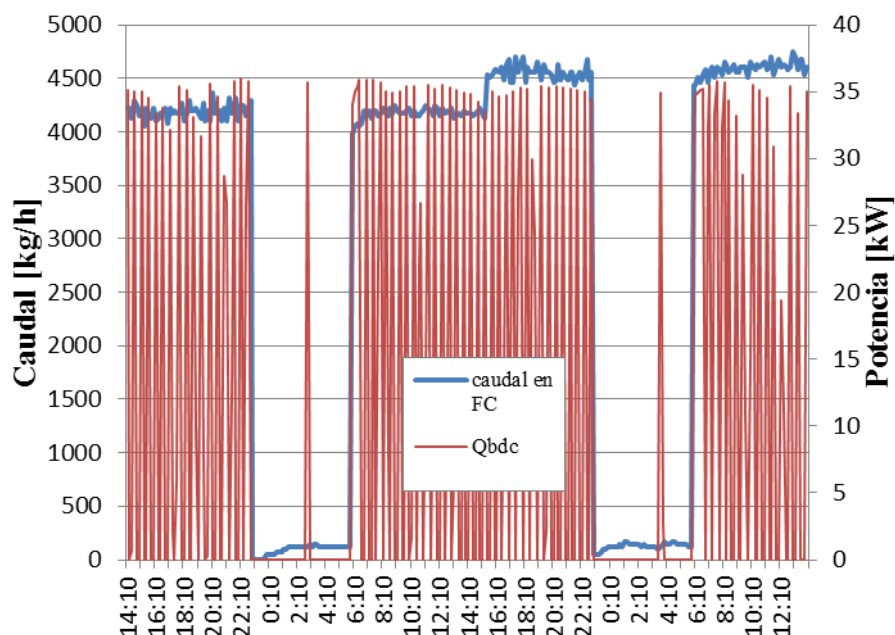


Figura 3. Potencia entregada por la bomba de calor y caudal existente en fan-coils

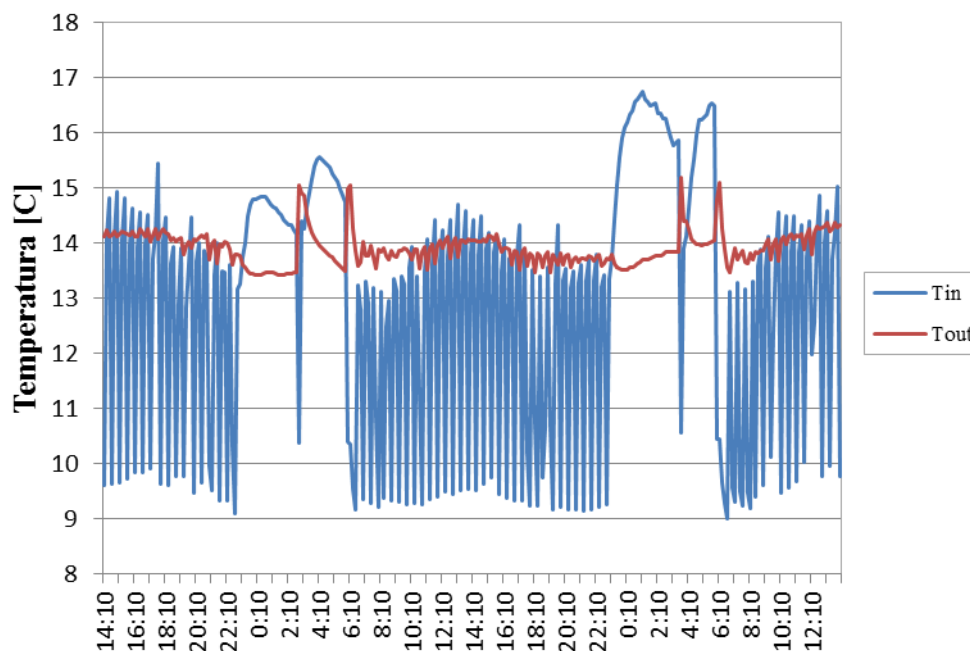


Figura 4. Variación de temperatura de entrada y salida del terreno

5.1. Intercambiador geotérmico

El intercambiador geotérmico es la pieza clave de este sistema y la validación del modelo usado en las simulaciones es una parte crucial para el posterior desarrollo del sistema completo.

Para ello, se hizo una primera verificación de este bloque tomando como entradas las lecturas reales de caudal y temperatura del flujo de fluido caloportador introducido en el intercambiador. La temperatura de salida del mismo flujo dada por la simulación se comparó con la lectura realizada por los sensores, obteniéndose un error medio del 10,40% y máximo de 20,42%. Una representación gráfica de la evolución en el tiempo de este error puede verse en la figura 5, estando representado únicamente el primer día de simulación para una mejor visualización.

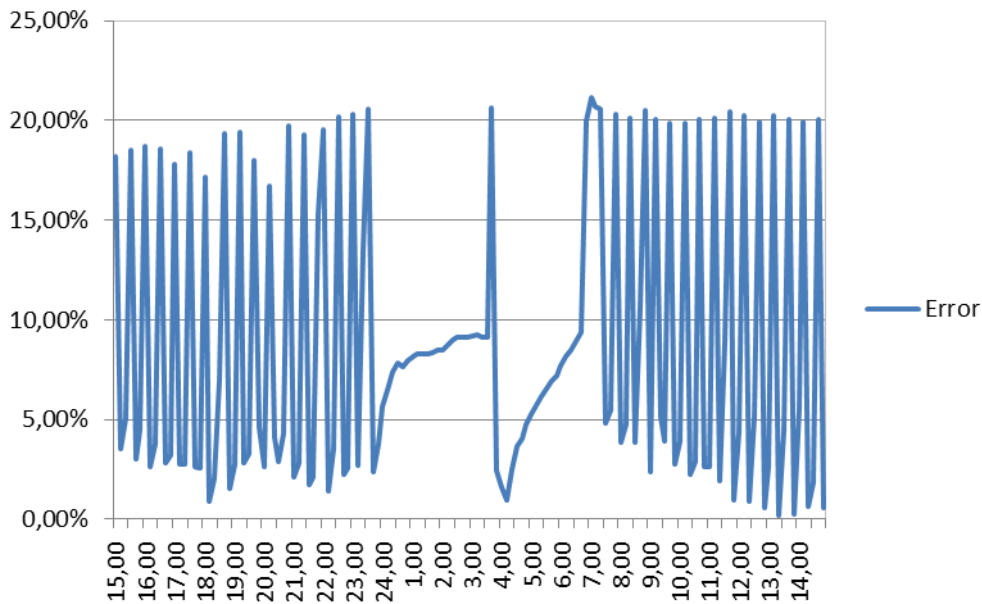


Figura 5. Variación del error de la temperatura de salida del terreno

De acuerdo con el error obtenido, se puede determinar que a priori estos resultados son bastante buenos ya que un error promedio en torno al 10% no es algo crítico a la hora de la realización de los cálculos de calor absorbido/aportado por el terreno, siempre y cuando se mantenga el salto térmico existente en cada instante. Sin embargo, se puede determinar que el comportamiento del intercambiador geotérmico es mejor que el previsto en la simulación. Esto puede ser debido a que se ha tomado una postura conservadora a la hora de definir los parámetros característicos del mismo (conductividad térmica, capacidad de almacenamiento energético, etc).

5.2. Sistema integrado

Por otro lado, se hace necesaria una validación del sistema en su conjunto. Para este caso se han vuelto a utilizar los mismos datos recogidos del mes de marzo, y se ha considerado como entrada la demanda energética del sistema.

Para llevar a cabo la comparativa en el seguimiento de la demanda existente en cada instante de tiempo, se han utilizado como referencia las temperaturas de entrada y salida del depósito de acumulación hacia los equipos de climatización (donde finalmente tiene lugar el intercambio de calor demandado), en este caso, los fan-coils. En este caso, nuevamente los errores en este caso están en torno al 10%, disparándose cuando deja de circular fluido por la instalación, como puede apreciarse en la figura 6. Este incremento en el error durante el periodo de parada de la instalación es debido a la colocación de los sensores de temperatura en el sistema real, ya que éstos miden la evolución del flujo condicionado por la temperatura ambiente de la sala, mientras que en el modelo sólo se tiene en cuenta la variación de la temperatura cuando se produce una demanda.

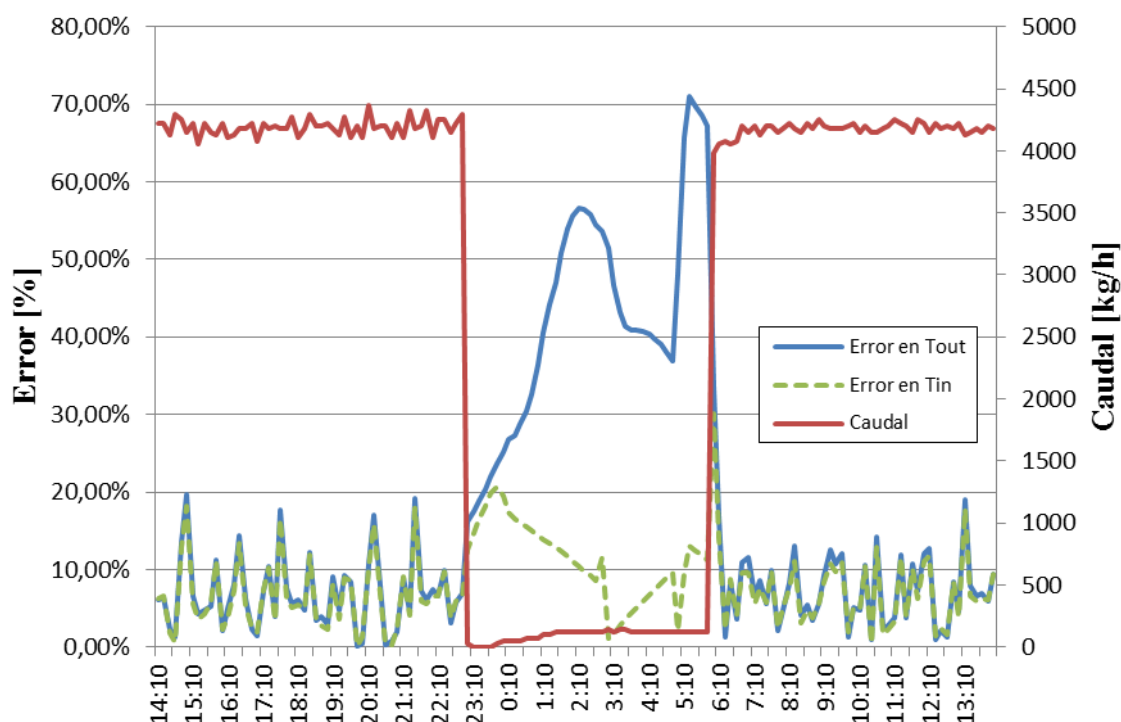


Figura 6. Variación del error en función del caudal en la salida y retorno del depósito de acumulación

Por otro lado, a nivel de validación del modelo en su conjunto, se han comparado también los balances energéticos producidos en la bomba de calor en la simulación con los datos obtenidos del piloto real. Así, para la totalidad del tiempo de simulación, las energías acumuladas son las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Resultados balances energéticos globales en la bomba de calor

	Piloto real [kWh]	Simulación [kWh]	Error [%]
Calor entregado por la BdC	1.181,09	1.157,78	1,97%
Potencia consumida por la BdC	325,70	312,25	4,13%
Calor absorbido del terreno por la BdC	855,38	845,53	1,15%

Como puede apreciarse, los resultados obtenidos se acercan en gran medida a la realidad, tanto a nivel térmico de calor entregado por la bomba de calor y absorbido del terreno, como a nivel de consumo eléctrico, el cual fue medido in-situ en cuadro mediante analizador de redes.

6. CONCLUSIONES

Como principal conclusión que se puede extraer del trabajo realizado es que, pese al margen de mejora aún existente, la herramienta ofrece unos resultados muy fiables sobre todo en lo concerniente a la potencia entregada y consumo de la bomba de calor, luego su función de elemento de ayuda al proceso de pre-dimensionamiento de una instalación de climatización basada en intercambio geotérmico (ya sea de tipo convencional o de cimentación termoactiva) la cumple a la perfección. Por otro lado, y en menor medida, también es bastante bueno el seguimiento de la demanda energética en cada caso, ya que un error en torno al 10% en las temperaturas del intercambiador final no se considera crítico a la hora de realizar el balance energético global de la instalación.

En cuanto al error encontrado en el módulo del intercambiador geotérmico, se puede establecer que en la instalación real éste está situado al aire libre en el terreno y por ello su evolución es diferente a la que sigue en el modelo. Pese a ello, aunque de forma puntual se alcancen errores superiores al 20%, el promedio del mismo se establece en un 10%, un dato más que aceptable teniendo en cuenta la dificultad a la hora de modelar el comportamiento del terreno.

Para finalizar, se puede establecer que la mejora de la herramienta se debe basar en el ajuste del balance en el intercambiador geotérmico y en el modelado del comportamiento del depósito durante el periodo de tiempo en el que no existe demanda energética.