

# Optimización de las instalaciones de bomba de calor geotérmica mediante la implementación de sistemas híbridos

TERESA MAGRANER (\*), SALVADOR QUILIS (\*) y SALVADOR MARTÍNEZ (\*)

**RESUMEN** Uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta en el diseño de un sistema de bomba de calor geotérmica es el balance de energía térmica en el subsuelo, ya que la saturación térmica del mismo conlleva pérdidas en el rendimiento del sistema a lo largo de su vida útil. Los sistemas geotérmicos híbridos, que combinan instalaciones de bomba de calor geotérmica con otros sistemas de generación o disipación energética, son muy adecuados para equilibrar el balance térmico en el subsuelo, optimizando los metros de intercambiador de calor necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, aspecto clave para disminuir los costes de implantación y conseguir atractivos periodos de retorno de la inversión inicial. Energesis Ingeniería ha desarrollado e implantado en dos edificios de oficinas un diseño de sistemas híbridos basados en la combinación de un sistema de bomba de calor geotérmica con unidades condensadas por aire (aeroterms) que permiten garantizar rendimientos energéticos comparables a los de los sistemas geotérmicos puros reduciendo sustancialmente el coste de implantación.

## OPTIMIZATION OF GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS THROUGH THE IMPLEMENTATION OF HYBRID SYSTEMS

**ABSTRACT** One of the fundamental aspects to consider in the design of a ground heat pump system is the heat balance in the ground, since thermal saturation of the ground produces a decreasing of the performance of the system throughout its useful life. The hybrid geothermal systems which combined geothermal heat pump systems with other systems for generation or dissipation energy are very suitable for balancing the heat balance in the ground and optimizing the heat exchanger meters needed for the proper functioning of the system, important aspect to reduce costs and achieve attractive return periods of the initial investment. Energesis Ingeniería has developed and implemented in two office buildings, a design of hybrid systems based on the combination of a geothermal heat pump and air-condensed units (drycoolers) that can ensure energy efficiencies comparable to geothermal pure systems, reducing substantially the investment cost.

**Palabras clave:** Sistemas de calefacción y refrigeración, Bombas de calor geotérmicas, Eficiencia energética, Energías renovables, Simulación computacional.

**Keywords:** Heating and cooling systems, Ground coupled (geothermal) heat pumps, Energy efficiency, Renewable energy, Computer simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Directiva 2009/28/EC del Parlamento Europeo y del Consejo 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables fija un valor de rendimiento estacional mínimo (SPF) para catalogar una instalación de bomba de calor como fuente de energía renovable. Es decir, serán las características de la bomba de calor y las temperaturas de trabajo de la misma en la instalación proyectada las que determinen el aprovechamiento renovable del sistema. Para garantizar unas temperaturas de trabajo adecuadas en el circuito del intercambiador de calor enterrado hay que cer-

tificar mediante el procedimiento de diseño del sistema geotérmico que no se va a alterar la temperatura del subsuelo a lo largo de la vida útil de la instalación.

Cuando un sistema de climatización geotérmica está proporcionando calefacción a un edificio, a su vez está enfriando el subsuelo o, lo que es lo mismo, extrayendo su calor. Por el contrario, cuando la instalación geotérmica funciona en modo refrigeración está cediendo calor al subsuelo calentándolo. La situación ideal de funcionamiento se da cuando, a lo largo de todo un año, la misma cantidad de calor que se extrae del subsuelo en invierno se cede en verano, es decir, el balance de energía en el terreno es nulo. Generalmente, las demandas energéticas de los edificios no son equilibradas, por lo que para mantener la temperatura estable del terreno sin calentarlo ni enfriarlo se necesita enterrar un intercambiador de calor mayor, lo que, para sistemas de grandes potencias, encarece considerable-

(\*) Energesis Ingeniería S.L.

mente la instalación. Una solución son los sistemas híbridos que combinan distintas tecnologías que permiten balancear la energía inyectada y extraída del subsuelo. Por ejemplo, en los países del norte de Europa, donde la demanda de calefacción prima sobre la de refrigeración, la combinación de las instalaciones de bomba de calor geotérmica con instalaciones de paneles solares térmicos es muy frecuente. Así, en verano, cuando la producción térmica de los paneles solares es mayor, se emplean los excedentes del calor generado por los mismos para calentar el terreno que se ha enfriado en invierno.

Otro tipo de sistemas híbridos son los que combinan el intercambio de calor con el suelo y con el aire y representan una solución muy adecuada para aquellos casos en los que la demanda energética anual en climatización está descompensada, predominando la carga de refrigeración, por ejemplo en climas mediterráneos y/o edificios con elevadas cargas internas (ocupantes, equipos, luminarias, etc.). Esta tecnología de sistemas híbridos constituye una parte muy pequeña del desarrollo de los sistemas geotérmicos a nivel internacional. Algunos trabajos han implementado una metodología para el dimensionado de este tipo de sistemas ajustándose a la potencia pico de calefacción (Kavanaugh, 1998) o han validado diferentes estrategias de control (Yavuzturk and Spitler, 2000) para optimizar el coste.

El uso de este tipo de instalaciones híbridas permite:

- **Reducir considerablemente el tamaño del intercambiador geotérmico** puesto que el dimensionamiento del intercambiador se realiza para la potencia de refrigeración nominal del edificio, no para la potencia pico. De esta manera en los momentos en donde por simultaneidad u otros factores se demande una potencia por encima de la nominal se pondrán en funcionamiento ambos sistemas (intercambiador y aerocondensador) para condensar las bombas de calor.
- **Reducir considerablemente el coste del intercambiador** y el tiempo de amortización de la instalación debido a la reducción de los metros de perforación.
- **Mejorar la eficiencia de la instalación.** Desarrollando un sistema de control adecuado se puede llegar a ahorrar más de un 30% respecto a un sistema convencional.
- **Utilizar en todo momento el foco de calor más eficiente.** En épocas de primavera-otoño donde se puede tener demanda de refrigeración es posible que sea más eficiente trabajar contra el ambiente que contra el terreno.
- **Regenerar el terreno.** Cuando en épocas de refrigeración aumenta la temperatura del terreno se puede evacuar el calor al ambiente mediante el aerocondensador. De esta misma manera también se puede preparar el terreno para la época estival disminuyendo su temperatura.

En resumen, la base de la optimización consiste en que el sistema geotérmico absorbe la mayor parte de la demanda energética, con lo que disminuye el consumo energético al estar trabajando con un foco de intercambio muy eficiente y, solo en algunas ocasiones puntuales en las que se sobrepasa la potencia base, entra en funcionamiento el sistema aire. Esto permite reducir la dimensión del intercambiador de calor enterrado sin variar el punto de funcionamiento de máxima eficiencia de la bomba de calor.

Los principales componentes de un sistema híbrido son los siguientes y se muestran esquemáticamente en la figura 1:

- intercambiador de calor enterrado
- bomba de calor condensada por agua
- aerocondensadores
- bombas de circulación y válvulas de tres vías
- sistema de control

Energesis Ingeniería ha desarrollado una metodología de diseño de este tipo de sistemas que se ha validado mediante la instalación, monitorización y seguimiento de su funcionamiento en dos edificios de oficinas ubicados en Gandia y Albuixech (Valencia).

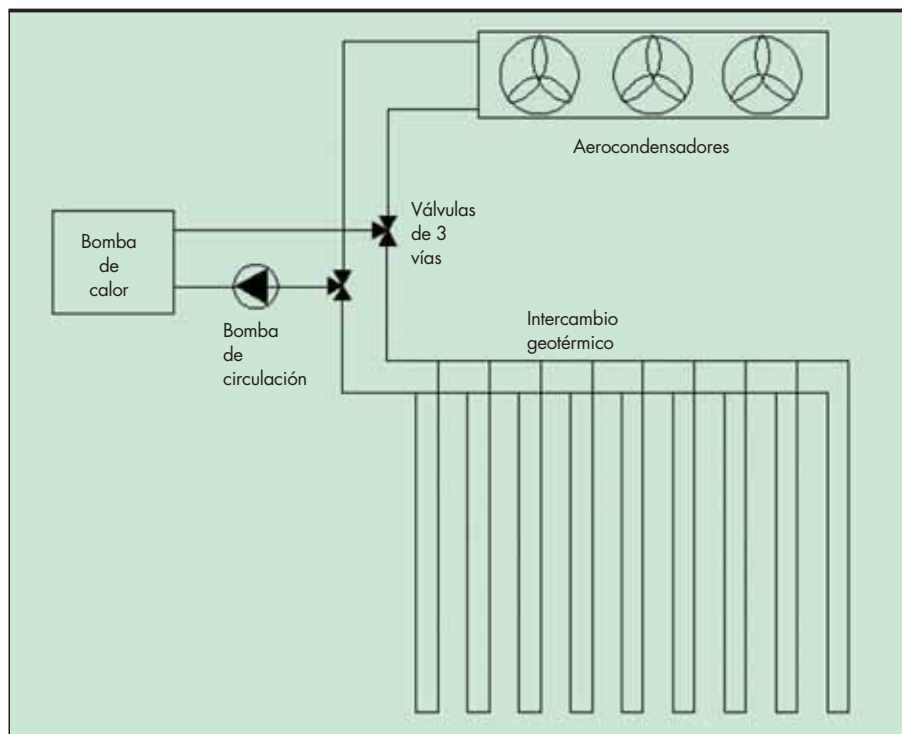


FIGURA 1. Esquema de los componentes de un sistema híbrido.

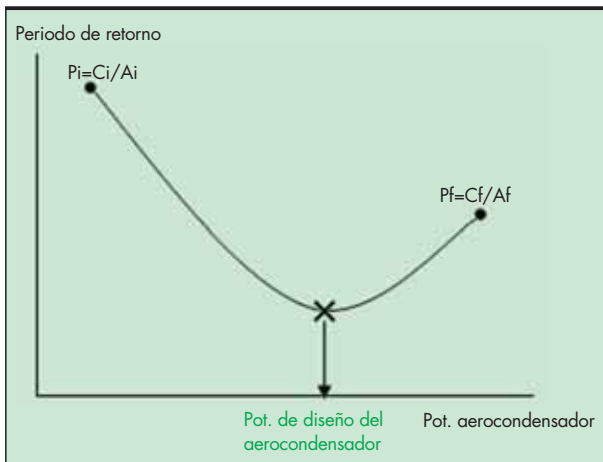


FIGURA 2. Criterio de dimensionado. Selección de la potencia del aerocondensador.

## 2. DISEÑO Y MODELADO DEL SISTEMA

El criterio de dimensionado de un sistema híbrido, es decir, el tamaño del intercambiador de calor enterrado (metros de perforación necesarios) y la potencia del aerocondensador auxiliar se basa en el periodo de retorno de la inversión. En la figura 2 se observa que existe un punto óptimo de diseño si representamos el cociente entre el coste de la instalación (C) y el ahorro energético en la explotación (A) en función de la potencia condensada en el foco aire. Esto significa que, en función del factor de utilización de la instalación, la instalación geotérmica puede estar más o menos sobredimensionada para la demanda base de energía, con lo que el aumento de coste de inversión es más significativo que el ahorro económico en la explotación.

En las figuras 3 y 4 se muestra el modo de funcionamiento de la instalación híbrida a lo largo de todo el año y a lo largo de un día de verano. En este caso, la potencia absorbida por el intercambiador geotérmico es de 100 kW, cuando se sobrepasa esta potencia, el aerocondensador entra en funcionamiento.

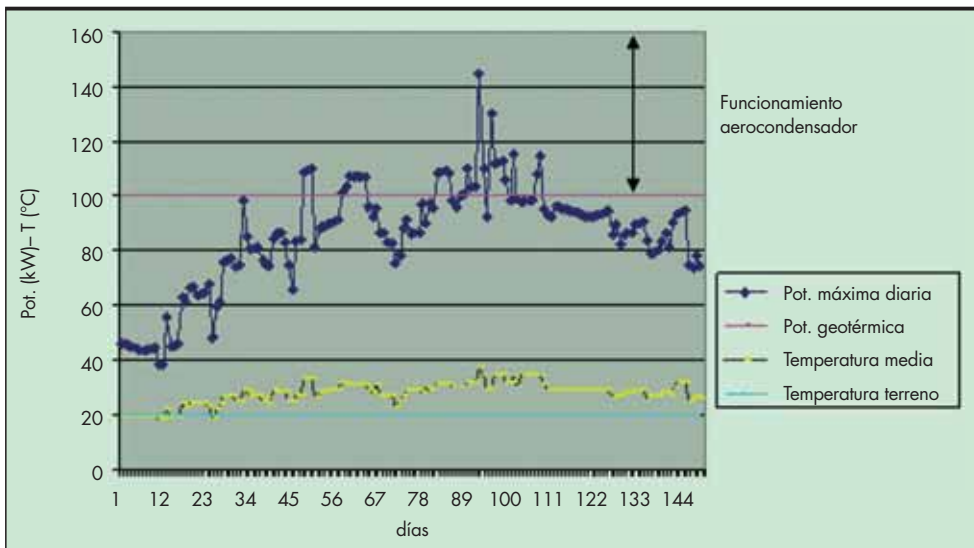


FIGURA 3. Modo de funcionamiento del sistema geotérmico híbrido a lo largo del año.

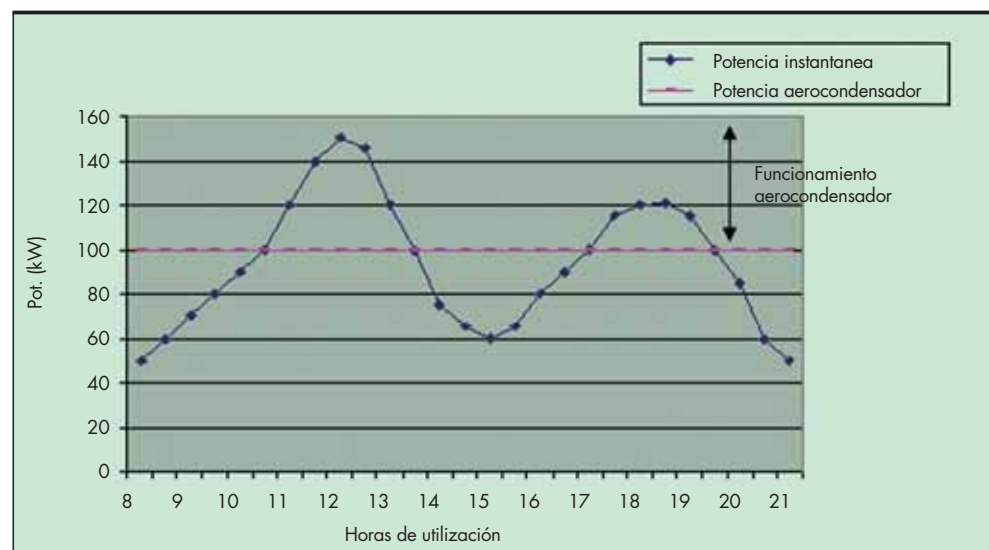


FIGURA 4. Modo de funcionamiento del sistema geotérmico híbrido en un día de verano.

En un día de verano, como se observa en la figura 4, el aercondensador únicamente entra en funcionamiento en determinadas horas del día en refrigeración, cuando el sistema demanda una potencia superior a la de diseño del sistema geotérmico.

El modelado de la instalación se ha realizado mediante el programa TRNSYS, que es un programa para la resolución de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los sistemas termoenergéticos más comunes y que se ha diseñado especialmente para simulaciones transitorias. Adopta una estructura modular para la resolución de sistemas de componentes, que permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos. Las simulaciones pueden realizarse en los rangos de tiempo especificados por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. La modularidad del programa permite al usuario tener tantos elementos, (bombas de calor, intercambiadores enterrados, controladores, refrigeradores, etc.), como sea necesario, en cualquier configuración y cuyo funcionamiento está totalmente validado y contrastado. Además, como los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard. En la figura 5 se puede ver el diseño modu-

lar del sistema híbrido mediante el programa TRNSYS.

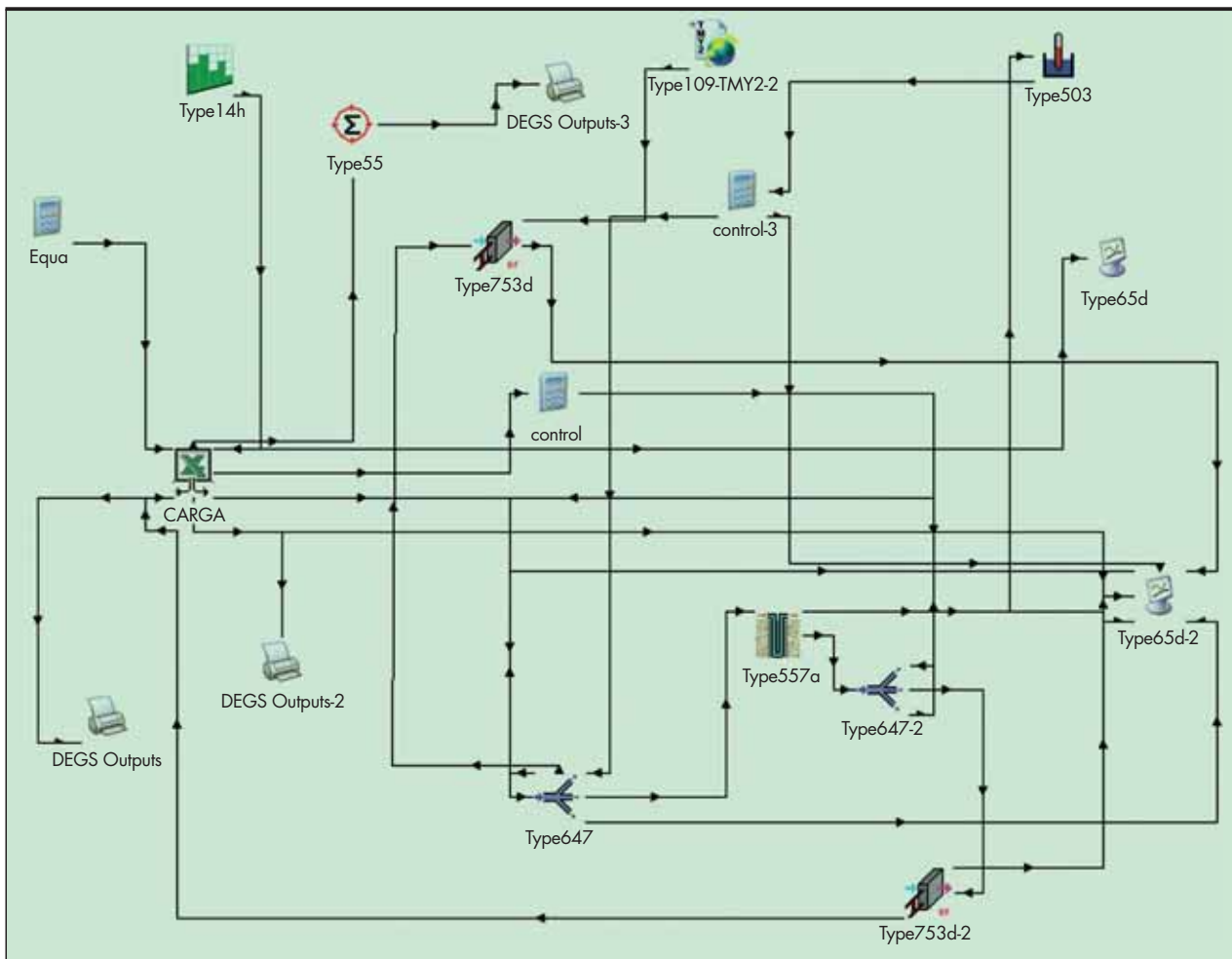
La estrategia de control del sistema híbrido definida para la simulación del sistema es la siguiente:

1. Control de la temperatura de fluido del intercambiador.
2. Mejor foco de intercambio de calor el ambiente que el terreno.
3. Regeneración del terreno.

En la figura 6 se puede observar los resultados de la simulación del sistema a lo largo de un año.

La primera condición descrita en la estrategia de control es la que indica que el intercambiador de calor enterrado está disipando más energía que para la que está diseñado, con lo que debe ponerse en funcionamiento el sistema de aercondensadores. Es la estrategia que rige el funcionamiento básico de un sistema híbrido. En la figura 6 se puede ver la evolución de las temperaturas de entrada (color naranja) y salida (color verde) del intercambiador de calor enterrado durante un año junto con la evolución esperada de la temperatura en el terreno (línea morada) y la temperatura ambiente (en azul). Se observa cómo cuando aumenta la temperatura del agua en el intercambiador de calor enterrado se produce la entrada en funcionamiento del sistema de aerotermos.

El segundo paso en la estrategia de control diseñada consiste en que el sistema emplee en todo momento el foco de



**FIGURA 5.** Diseño del sistema híbrido en el programa TRNSYS.

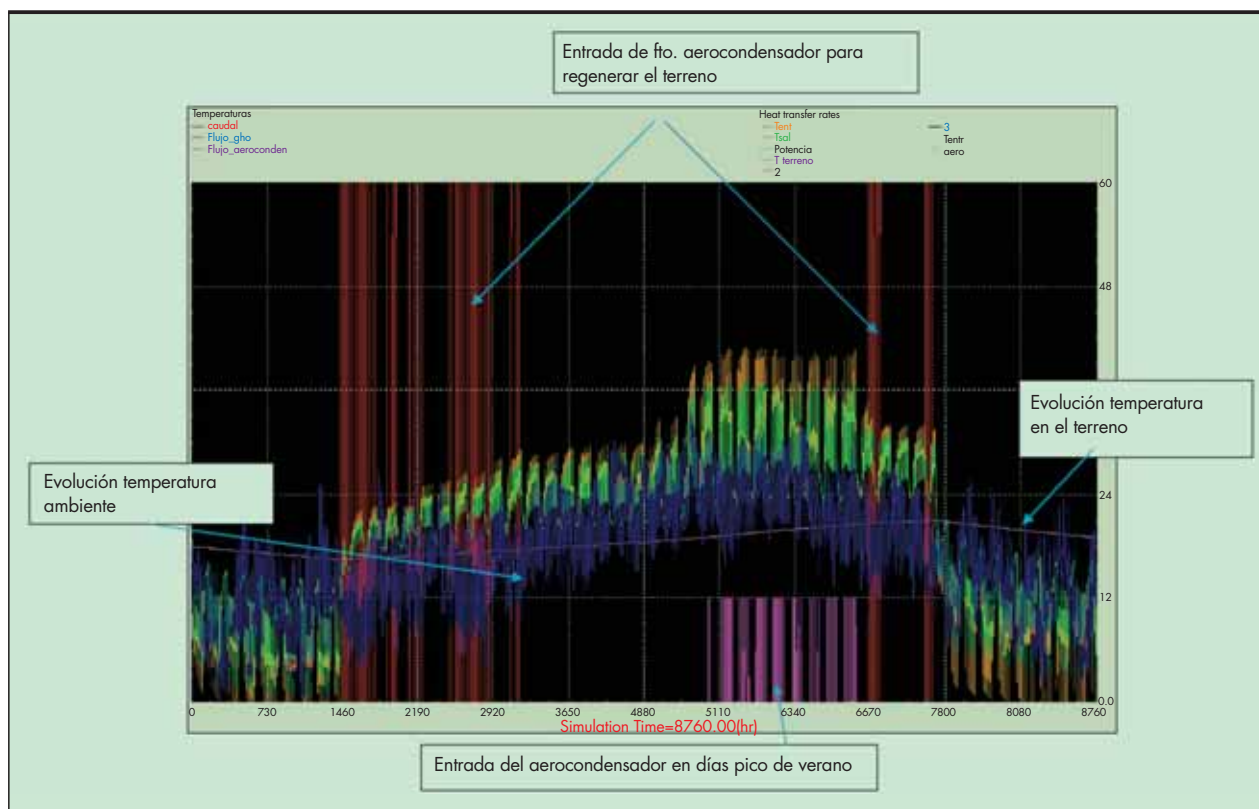


FIGURA 6. Resultados de la simulación en Trnsys de la instalación híbrida a lo largo de un año.

intercambio de calor más eficiente. Esta estrategia se aplica fundamentalmente en épocas de primavera y otoño, donde se puede tener demanda de refrigeración, y es posible que sea más eficiente trabajar contra el ambiente que contra el suelo.

Por último, la tercera condición implementada en el sistema de control es la que permite la regeneración del terreno. Es decir, cuando en épocas de primavera y otoño con demanda de refrigeración aumenta la temperatura del terreno, se puede evacuar el calor al ambiente mediante el aerocondensador por las noches, cuando la temperatura exterior es suave y la instalación no está en funcionamiento. De esta manera se puede preparar el terreno para la época estival disminuyendo su temperatura y aumentando la eficiencia del intercambiador geotérmico en esta temporada. En la figura 6 se ve cómo funciona el aerocondensador para regenerar el terreno en las épocas de primavera y otoño (línea roja).

En la tabla 1 se resumen las estrategias de control descritas que permiten que entre en funcionamiento el sistema de aerocondensadores. Para programar el control, hay que fijar una temperatura límite que determine la máxima potencia a

disipar en el terreno, así como unas bandas de temperatura en los modos en los que se trabaja con el aire como foco térmico o en regeneración. En este último caso también se debe programar el horario nocturno de funcionamiento.

### 3. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EN GANDÍA (VALENCIA)

Energesis Ingeniería ha implantado un sistema geotérmico híbrido en un edificio de oficinas en la ciudad valenciana de Gandía. El edificio consta de una planta sótano, una semisótano, 4 plantas sobre rasante y la planta de cubierta. Alrededor del edificio existe una zona de paso donde se ha ubicado el intercambiador de calor enterrado (Figura 7).

El edificio dispone de una sala de conferencias, una sala de exposiciones, varias aulas de formación, etc. cuyo uso no es continuo, por lo que al estudiar su perfil energético se observó que la demanda base diaria era muy inferior a la demanda total. Por este motivo y por las restricciones de espacio para ubicar el intercambiador de calor enterrado, se decidió realizar un sistema geotérmico híbrido.

| ESTRATEGIA               | CONDICIÓN                                                           |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Control T intercambiador | $T_{salida\ intercambiador} > T_{límite}$                           |
| Mejor foco intercambio   | $T_{amb} + \Delta T_1 < T_{sal}$                                    |
| Regeneración terreno     | $T_{amb} + \Delta T_2 < T_{salida\ intercambiador} \ 0 < t < 6 \ h$ |

TABLA 1. Estrategias de control implementadas.





**FIGURA 7.** Edificio de oficinas climatizado en Gandia (Valencia)

A partir de los datos del perfil energético del edificio y de la conductividad térmica de la parcela, determinada “in situ” mediante el laboratorio móvil que dispone Energesis Ingeniería, se concluyó que era necesario realizar un intercambiador de calor enterrado de 16 perforaciones de 100 metros de profundidad para disipar una potencia en refrigeración de 100 kW, y el resto de potencia instalada se disiparía en tres baterías de aerocondensadores de 33 kW cada una. Las bombas de calor instaladas son unidades Mitsubishi de refrigerante variable.

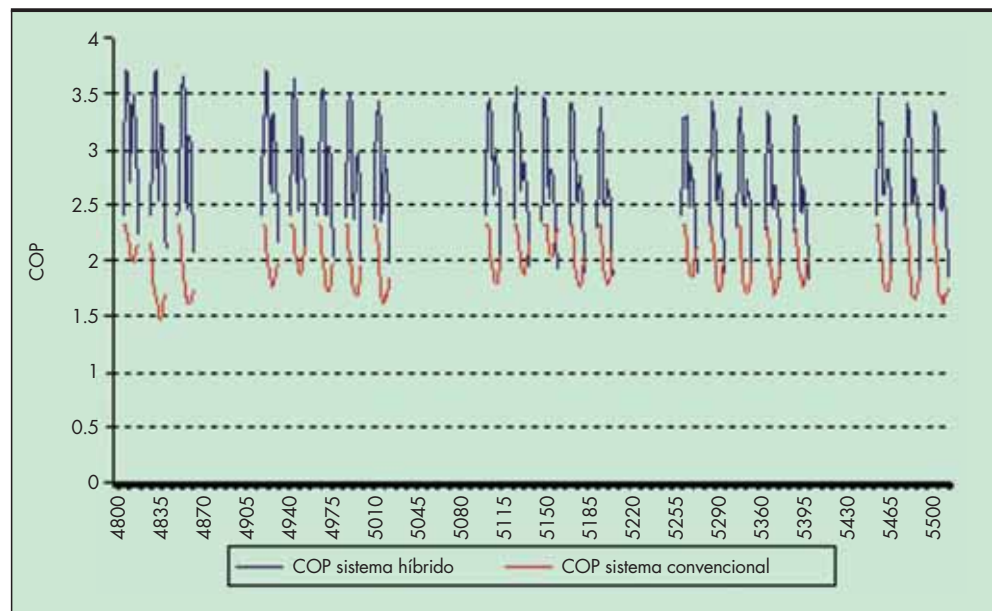
Con el objeto de comparar resultados, además de la simulación para diseñar el sistema de control descrita en el apartado anterior, se ha realizado la simulación del mismo edificio con una bomba de calor convencional. Los rendimientos obtenidos en la época estival para ambos sistemas se refle-

jan en la figura 9. Como se observa, con el sistema híbrido se alcanzan valores de rendimiento mucho más elevados, con valores medios de 2.8, mientras que el rendimiento medio del sistema convencional es de 1.9. Los valores de rendimiento medio de la instalación híbrida permiten catalogarla como una instalación de energía renovable, según el criterio de la directiva 2009/28/EC. Hay que tener en cuenta que para determinar el rendimiento estacional de la instalación híbrida, se considera tanto el consumo eléctrico de los grupos hidráulicos como de los aerotermos, además del de las bombas de calor.

En cuanto a la inversión en la instalación, ejecutada en el año 2007, en la siguiente tabla se puede ver la comparativa de costes respecto a un sistema todo geotérmico. Como se observa, el sistema híbrido es un 25% más económico.



**FIGURA 8.** Bombas de calor y unidades de aerotermos de la instalación.



**FIGURA 9.** Evolución de los rendimientos del sistema híbrido y del sistema convencional.

|                                       | Sólo geotérmico | Sistema híbrido |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Longitud de la perforación (m)        | 2.400           | 1.600           |
| Coste intercambiador enterrado (€)    | 175.138         | 116.758         |
| Coste instalación aerocondensador (€) | 0               | 12.472          |
| Coste sistema de control (€)          | 0               | 1.948           |
| <b>Total coste (€)</b>                | <b>175.138</b>  | <b>131.178</b>  |

**TABLA 2.** Comparativa entre la inversión de un sistema geotérmico puro y un sistema híbrido

#### 4. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EN ALBUIXECH (VALENCIA)

En Albuixech se ha instalado un sistema geotérmico híbrido en el edificio de oficinas de la planta de Cemex, la instalación diseñada tiene una potencia de 30 kW de refrigeración, una tercera parte de la potencia necesaria para climatizar al edificio.

Esta potencia se ha seleccionado para ajustarse a las especificaciones de tamaño del proyecto de investigación en el que se enmarca la instalación. El intercambiador geotérmico dispone de cuatro perforaciones de ochenta metros de profundidad más una potencia de 18 kW disipada en los aerotermos.

En la figura 10 se puede ver una de las fases de la ejecución del sistema, llevada a cabo durante el mes de marzo



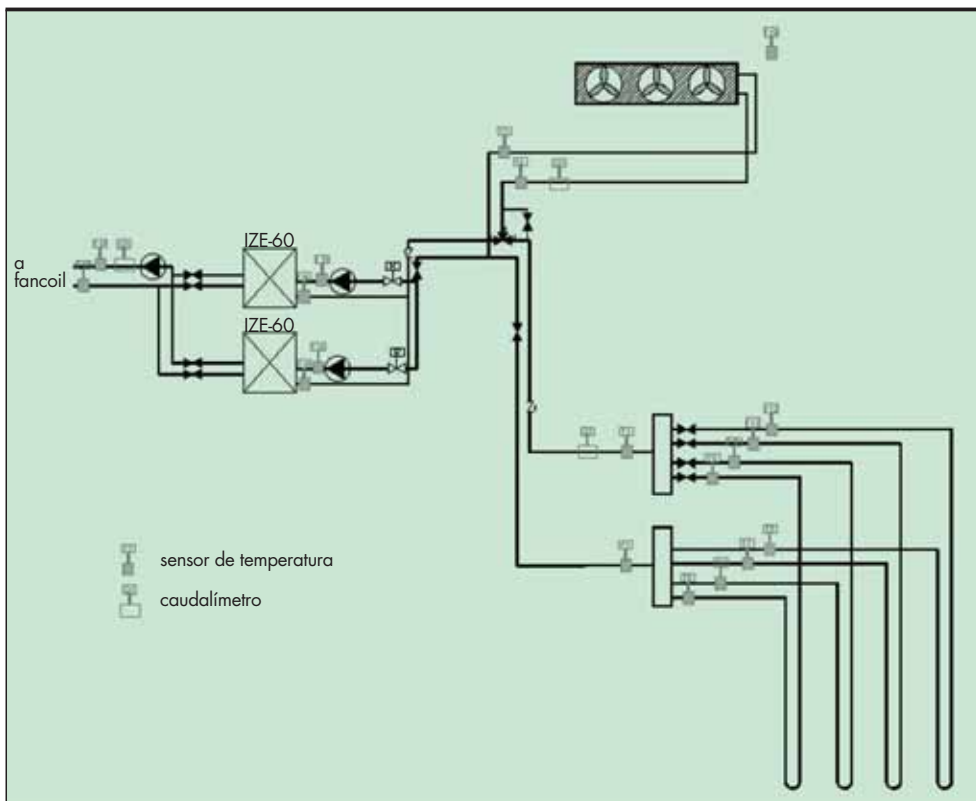
**FIGURA 10.** Ejecución del intercambiador de calor enterrado en la planta de Cemex de Albuixech.



**FIGURA 11.** Ejecución de una arqueta para la instalación de sensores de temperatura.

de 2009. Uno de los aspectos más importantes durante la fase de instalación ha sido la implementación de un sistema de monitorización que permite analizar los parámetros más importantes durante el funcionamiento de la misma para validar el rendimiento de los sistemas híbridos.

El sistema de monitorización diseñado consta de diecinueve sondas de temperatura, tres caudalímetros, un analizador de redes, una centralita y un ordenador (véase figura 12). Con todos estos elementos se podrán determinar las diferentes temperaturas de funcionamiento, el consumo de energía eléctrica del sistema y el caudal circulante por cada uno de los circuitos.



**FIGURA 12.** Esquema de principio de la instalación geotérmica híbrida de CEMEX en Albuixech (Valencia).



Con estas medidas y mediante la siguiente fórmula se obtiene la potencia térmica instantánea en cada uno de los circuitos de la instalación que son: el circuito interno, entre la salida de la bomba de calor y las unidades terminales del edificio (fancoils), el circuito de los aerotermos, entre la entrada a la bomba de calor y los aerotermos, y el circuito geotérmico, entre la entrada a la bomba de calor y el intercambiador enterrado. La fórmula general a emplear es:

$$Potencia\_termica = m * Cp(t) * (T_e - T_s) \quad (1)$$

$Cp(t)$  es una función de la temperatura del agua que supondremos constante e igual a  $Cp(20)$ , estando  $t$  expresado en °C,  $m$  es el caudal registrado por el caudalímetro del circuito correspondiente y  $T_e$  y  $T_s$  son las temperaturas de entrada y salida del circuito correspondiente.

Por tanto, mediante esta fórmula se podrá determinar la carga térmica que está demandando el edificio aplicando la ecuación al circuito interno, la energía cedida o extraída del terreno, si se aplica esta expresión al circuito geotérmico, así como la potencia disipada en los aerotermos si se toman los valores registrados en este último circuito.

El cálculo del COP del sistema se determina con los valores de potencia eléctrica consumida por la instalación registrados por el analizador de redes y la potencia térmica cedida al edificio.

$$COP = \frac{Potencia\_termica\_edificio}{Potencia\_electrica} \quad (2)$$

La puesta en marcha, pruebas y calibración de la instalación de monitorización se ha realizado durante el verano de 2009. En las siguientes gráficas se muestran algunos de los valores registrados durante el funcionamiento del mes de septiembre.

En la figura 13 se puede observar el funcionamiento de instalación durante dos días del mes septiembre. Se representa el caudal circulante por el intercambiador geotérmico y el caudal que trasiega por el aerocondensador. La instalación condensa todo el caudal por las sondas geotérmicas y cuando se supera el punto de consigna, parte de este caudal es derivado al aerocondensador.

La línea horizontal de la figura 14 es la que marca el punto de consigna en el que entra en funcionamiento el aerocondensador. Esta alarma se activa cuando la temperatura de retorno del intercambiador geotérmico supera los 32°C, en ese mismo momento salta la alarma y las válvulas cambian su posición permitiendo que parte del caudal se derive a la condensación por aire.

Las figuras 15 y 16 muestran diferentes tipos de uso de la instalación. El punto 1 corresponde a las horas centrales del día donde la carga de refrigeración es mayor produciéndose un uso intensivo de la instalación. En el punto 2 es un comportamiento en el que la instalación está constantemente arrancando y parando debido a que se alcanza rápidamente la temperatura de confort en los espacios climatizados. Por último queda el punto 3 en el que la instalación está parada.

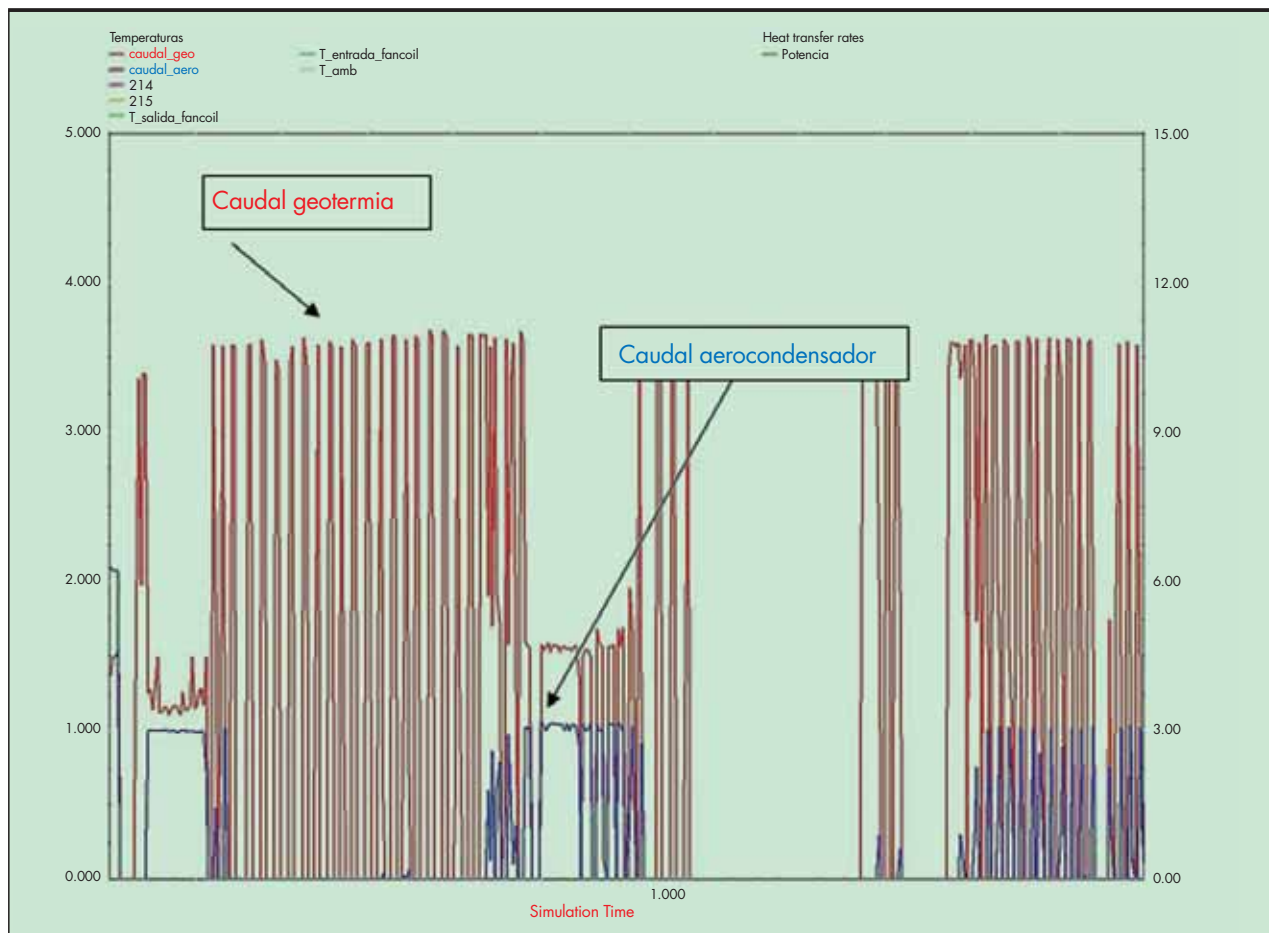
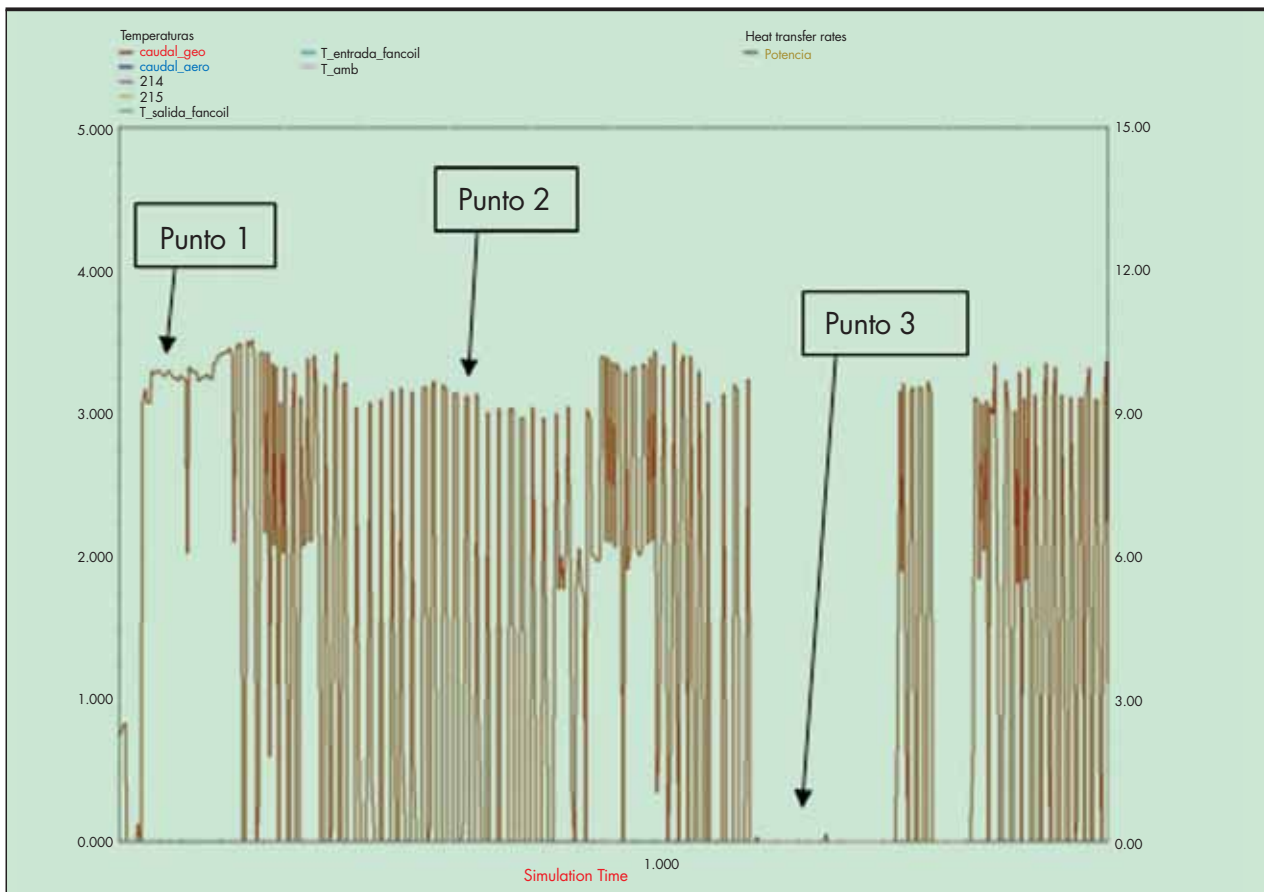
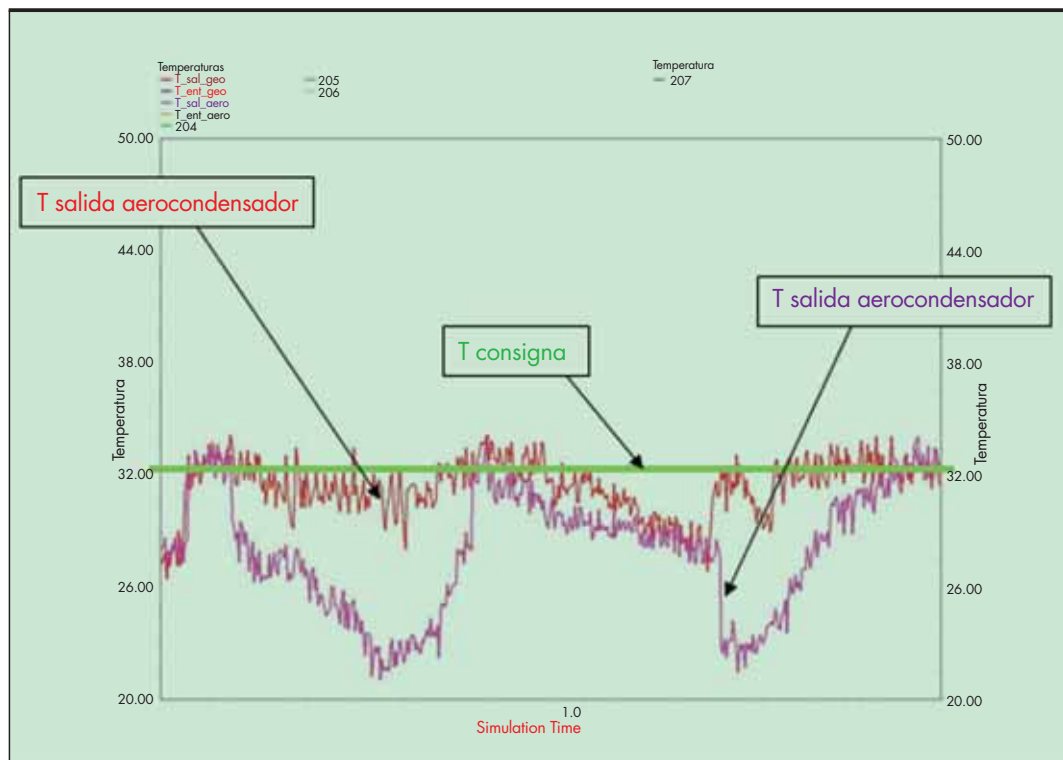


FIGURA 13. Caudal de la instalación entre las 13:00 del 14/09/2009 y las 12:59 del 16/09/09.

**FIGURA 14.**  
Temperatura salida  
en el colector  
geotérmico y en el  
aerocondensador  
entre las 13:00 del  
14/09/2009 y las  
12:59 del  
16/09/2009.



**FIGURA 15.** Potencia eléctrica consumida por la instalación entre las 13:00 del 14/09/2009 y las 12:59 del 16/09/2009.

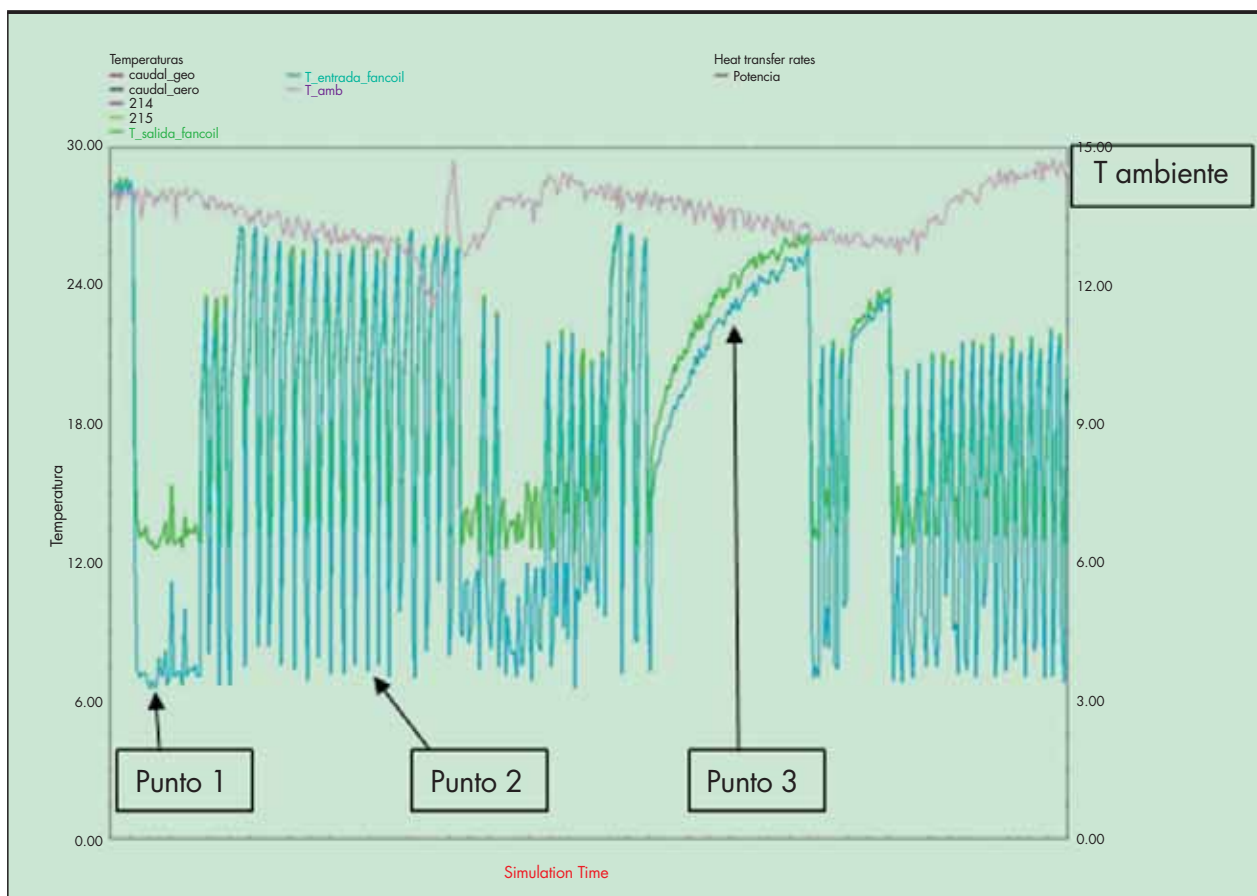


FIGURA 16. Temperatura de entrada/salida en el fancoil y temperatura ambiente entre las 13:00 del 14/09/2009 y las 12:59 del 16/09/2009.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo de los trabajos llevados a cabo por Energesis Ingeniería en el campo de los sistemas híbridos es optimizar tanto el funcionamiento como los costes de inversión de los sistemas de climatización geotérmica. En este trabajo se han presentado los resultados de diseño de un sistema híbrido implantado en un edificio de oficinas de Gandia, realizando una comparativa de rendimientos energéticos frente a un sistema de climatización convencional y de costes de inversión frente a un sistema geotérmico puro. Se puede concluir que el sistema híbrido es más eficiente que un sistema convencional, con rendimientos medios estacionales que lo pueden certificar como un sistema de energía renovable y es significativamente más económico que un sistema geotérmico puro.

También se ha presentado el diseño, la ejecución y monitorización de una planta piloto de un sistema geotérmico híbrido realizada, durante el año 2009, en las oficinas de la planta de Cemex de Albuixech. La ejecución de esta planta se ha realizado con el objetivo de que el análisis de todos los parámetros monitorizados permita caracterizar el funcionamiento de la planta y determinar su rendimiento estacional para demostrar la viabilidad técnica y económica de este tipo de sistemas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Energesis Ingeniería agradece a la empresa CEMEX la cesión de sus instalaciones para la ubicación de la planta piloto así como la colaboración del personal de la planta de Albuixech

durante la ejecución del proyecto. Este trabajo ha sido realizado financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (IDI-2008915).

También cabe mencionar a la empresa Azimut Electronics por la apostar por la instalación del primer sistema de climatización geotérmica híbrido de España en su nueva sede de oficinas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- KAVANAUGH, S. and K. RAFFERTY (1997). "Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings". ASHRAE.
- KAVANAUGH, S. (1998). "A Design Method for Hybrid Ground-Source Heat Pump". ASHRAE Transactions: Symposium 1998.
- YAVUTZTURK, C. and J.D. SPITLER (2000) "Comparative Study to Investigate Operating and Control Strategies for Hybrid Ground Source Heat Pump Systems Using a Short Time-step Simulation Model" ASHRAE Transactions: Symposium 2000.
- KLEIN et al. (2006) "TRNSYS A Transient System Simulation Program, User's Manual, Version 16". Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison (2006).
- MAGRANER et al. (2008) "Optimización de sistemas geotérmicos mediante la implementación de sistemas híbridos". Libro de Actas del I Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria.