

## VALIDACIÓN DEL MODELO B2G PARA UN INTERCAMBIADOR ENTERRADO EN FUNCIONAMIENTO ON/OFF

CORBERÁN SALVADOR, José Miguel <sup>(1)</sup>; RUIZ CALVO, Félix <sup>(1)</sup>;

MONTAGUD MONTALVÁ, Carla <sup>(1)</sup>; DE ROSA, Mattia <sup>(2)</sup>

fliruica@upv.es

<sup>(1)</sup>Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería Energética; Camino de Vera sn 46022 Valencia, España.

<sup>(2)</sup>University of Genoa, DIME/TEC - Division of Thermal Energy and Environmental Conditioning, Via All'Opera Pia 16145 Genoa, Italy.

### RESUMEN

El diseño y optimización de sistemas de climatización requiere de la capacidad de predecir y reproducir el comportamiento dinámico de cada componente del sistema. Para sistemas de climatización por bomba de calor acoplada al terreno, uno de los elementos principales a estudiar es el intercambiador enterrado. A lo largo de los últimos años se han desarrollado varios tipos de modelos de intercambiador enterrado, con distintas características en función del planteamiento utilizado. Sin embargo, muchos de los modelos existentes se basan en aproximaciones de régimen permanente, por lo que no permiten simular el comportamiento dinámico del intercambiador, mientras que los que sí lo permiten resultan ser modelos altamente complejos, con un elevado coste computacional, lo que dificulta y restringe su uso.

En la Universitat Politècnica de València (UPVLC) se ha estado desarrollando un modelo completo de una instalación de climatización por bomba de calor acoplada al terreno. En el marco del desarrollo de este modelo, ha sido necesario desarrollar un nuevo modelo de intercambiador enterrado, capaz de predecir el comportamiento dinámico del intercambiador y suficientemente rápido como para poder ser integrado en el modelo completo de la instalación sin elevar excesivamente el coste computacional. Este modelo, llamado modelo B2G (*Borehole-to-Ground*) ha sido presentado y validado con datos experimentales de una instalación situada en Estocolmo, Suecia [1]. Su funcionamiento ha sido comparado con el de un modelo estándar, basado en el comportamiento en régimen permanente [2], con resultados satisfactorios. En el presente trabajo se presenta una extensión de la validación de este modelo, utilizando datos experimentales correspondientes a la instalación de la UPVLC. Para ello se realizan dos tipos de validación, usando como datos de entrada al modelo la temperatura del agua a la entrada del intercambiador y, posteriormente, la carga térmica intercambiada con el terreno. Comparando los resultados con los datos experimentales se comprueba la capacidad del modelo para predecir el comportamiento dinámico del intercambiador enterrado.

**Palabras clave:** intercambiador enterrado, modelo dinámico, bomba de calor acoplada al terreno

## 1. Introducción

Los sistemas de climatización por bomba de calor acoplada al terreno (GSHP, *Ground Source Heat Pump*) se encuentran entre los más eficientes energéticamente [3]. Con este tipo de sistemas se puede obtener un ahorro de hasta un 40% respecto de los sistemas con bomba de calor aire-agua convencionales [4]. Sin embargo, la eficiencia energética de un sistema de GSHP depende de un correcto diseño y fabricación, teniendo en cuenta las distintas condiciones de funcionamiento en las que trabajará el sistema; y de la implementación del algoritmo de control más adecuado para cada caso, que permitirá optimizar el comportamiento de la instalación. Tanto en el proceso de diseño como en el de optimización de la GSHP, resulta imprescindible disponer de modelos que permitan estudiar la instalación de forma teórica, previo a la implementación experimental de la misma.

Dentro de los componentes de una instalación de GSHP, el intercambiador enterrado resulta ser fundamental en el sistema, puesto que es lo que lo distingue de otros sistemas de climatización. Como tal, en la obtención de un modelo global de la instalación, el modelo de intercambiador enterrado utilizado tendrá una influencia considerable en los resultados finales.

Muchos de los modelos de intercambiador enterrado más comúnmente utilizados están enfocados en el modelado de la respuesta del terreno en régimen estacionario. Entre ellos, el modelo desarrollado por Eskilson [5] es uno de los más extendidos. En este modelo, la respuesta de la temperatura del terreno ante una inyección constante de carga se modela mediante factores adimensionales, llamados *g-functions*. Con la extensión de este modelo llevada a cabo por Yavuzturk y Spitler [6], se consigue reducir el mínimo intervalo de tiempo de simulación del modelo hasta intervalos de una hora. Sin embargo, el modelo de *g-functions* no permite reproducir la respuesta transitoria de las temperaturas del intercambiador.

Para el modelado dinámico del intercambiador enterrado se suelen utilizar modelos basados en técnicas de elementos finitos (FEM, *Finite Elements Model*). En este caso, es posible obtener la respuesta del intercambiador enterrado para tiempos de simulación reducidos, lo que permite estudiar la respuesta en régimen transitorio. Sin embargo, el coste computacional de este tipo de modelos es elevado, si se compara con el de los modelos de respuesta estacionaria.

Por otra parte, existen modelos basados en la aproximación del intercambiador enterrado como una red térmica, utilizando un número de nodos adaptado a la tipología del intercambiador. En estos modelos, la determinación de los valores de los parámetros de la red térmica resulta ser un proceso complejo. Sin embargo, con esta aproximación se pueden conseguir resultados tanto en régimen transitorio como permanente, con un coste computacional menor que el de los modelos FEM.

En el desarrollo del modelo global de una instalación de GSHP, se requiere un modelo de intercambiador enterrado con un coste computacional relativamente reducido. La optimización del sistema y de los algoritmos de control depende tanto de la evolución a largo plazo como de los valores instantáneos de las temperaturas en diversos puntos del sistema. Así pues, el modelo de intercambiador enterrado debe también ser capaz de predecir el comportamiento del intercambiador tanto instantáneamente como a medio y largo plazo.

En este contexto, en [1] se propone un nuevo modelo, llamado B2G (*Borehole-to-Ground*), enfocado a la simulación del comportamiento instantáneo del intercambiador enterrado para cortos periodos de tiempo. Este modelo puede acoplarse con un modelo estacionario (como la *g-function*), para formar un modelo completo de intercambiador enterrado que cumple con las características arriba mencionadas.

En el presente trabajo, se comprobará la validez de este modelo para la predicción de la temperatura de salida del intercambiador enterrado de una instalación experimental con control ON/OFF. La instalación en cuestión se encuentra situada en la Universitat Politècnica de València (UPVLC), y se describe en la sección 2.1. El modelo B2G se presenta brevemente en la sección 2.2. A continuación se presentarán los resultados obtenidos de la simulación de este modelo en las condiciones de funcionamiento expuestas, y se compararán con las medidas experimentales correspondientes.

## 2. Metodología

En los siguientes apartados se describen los elementos principales del presente trabajo: la instalación experimental de la UPVLC y el modelo B2G. Además, se comentan también los aspectos básicos de la simulación realizada y los parámetros utilizados.

### a. Descripción de la instalación

La instalación analizada consiste básicamente en una bomba de calor geotérmica, un circuito hidráulico interior y un circuito hidráulico exterior como se muestra en la Fig. 1 (a).

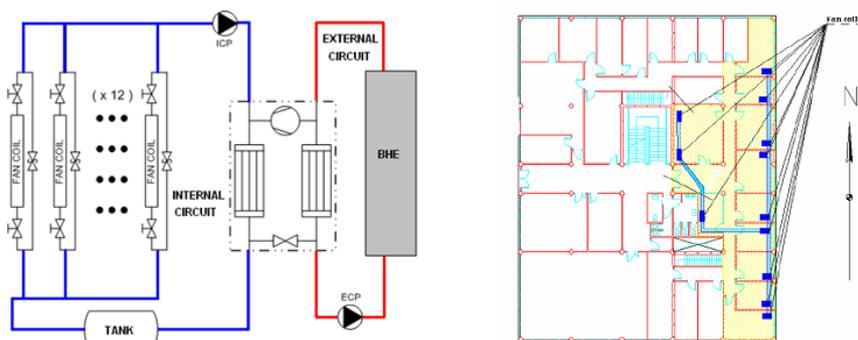


Figura 1: Sistema GSHP (a) Esquema general de la instalación (b) Distribución de zonas a climatizar

Se trata de una bomba de calor agua-agua reversible que utiliza como fuente de calor externa un intercambiador de calor enterrado (GSHX). Las capacidades calorífica y frigorífica nominales son 18 kW (45°C retorno/16°C retorno) y 14 kW (30°C retorno/12°C retorno), respectivamente. El funcionamiento de la bomba de calor se rige por un controlador electrónico que, dependiendo de la temperatura de suministro del agua al edificio, enciende o apaga el compresor de la bomba de calor. La bomba de circulación externa está controlada por el propio controlador de bomba de calor que activa la bomba externa 60 segundos antes de la activación del compresor. El GSHX en sí consta de seis pozos verticales conectados en paralelo y dispuestos en una malla rectangular 2x3 (18m<sup>2</sup>) con una separación de 3 m entre perforaciones. Cada pozo tiene una profundidad de 50 metros y contiene una sonda de polietileno en U de 25.4 mm de diámetro interno, con una separación de 70 mm entre el tubo ascendente y descendente. A la entrada y salida de cada pozo existe una válvula de equilibrado, asegurando así que el caudal que circula por cada uno es el mismo e igual a 1/6 del caudal total. El diámetro total del pozo es de 150 mm. El edificio (véase la Fig. 1b), al cual la instalación suministra calefacción y refrigeración, se compone de aproximadamente 250 m<sup>2</sup> de superficie e incluye un pasillo, nueve oficinas (que se encuentran en la fachada este del edificio), una sala de ordenadores y un cuarto de fotocopadoras. El bucle existente en el edificio consta de una serie de 12 *fan coils* conectados en paralelo, un circuito hidráulico interno y un depósito de inercia de 189 litros.

El tipo de terreno en el que se encuentra la instalación consiste fundamentalmente en una mezcla de arenas y gravas. Las propiedades termodinámicas del terreno fueron determinadas a través de medidas de laboratorio, utilizando muestras de terreno seco, obteniéndose valores de conductividad térmica del terreno de 1.43 W/m·K, con una incertidumbre del 20%. En el caso de la capacidad calorífica volumétrica se obtuvo un valor de 2.25MJ/m<sup>3</sup>·K. Sin embargo, al ser el nivel freático igual a 3.5 en la zona donde se encuentra la instalación, es muy posible que el terreno se encuentre saturado de agua, pudiendo ser significativamente mayores los valores efectivos de la conductividad térmica y de la capacidad calorífica volumétrica.

Con el objeto de monitorizar y realizar un seguimiento de los parámetros más relevantes del sistema, se estableció una red de sensores a lo largo de la instalación para medir la temperatura a la entrada y salida de cada circuito hidráulico, así como la temperatura de entrada y salida del agua en cada uno de los seis pozos. El flujo másico en cada circuito se mide por medio de un medidor de flujo de tipo Coriolis. El consumo de energía eléctrica asociado con el compresor y bomba de circulación externa, la bomba de circulación interna y los *fan coils* se registra en dos medidores de potencia por separado.

Los sensores de temperatura consisten en cuatro PT100 con precisión  $\pm 0,1$  °C. Los medidores de flujo másico de tipo Coriolis son del fabricante Danfoss, modelo massflo MASS 6000 y tienen una precisión menor del 0,1%. Los medidores de potencia son medidores multifuncionales de Gosson Metrawatt, modelo A2000, con una precisión de  $\pm 0,5\%$  del valor nominal. Los datos de esta red de sensores son recogidos por una unidad de adquisición de datos Agilent HP34970A con plug-in de módulos HP34901A.

Con el fin de entender mejor el comportamiento del sistema, se analizará el funcionamiento de la instalación durante un día típico en calefacción. La Fig. 2 muestra la evolución de las temperaturas de entrada y de salida en los circuitos hidráulicos interior y exterior.

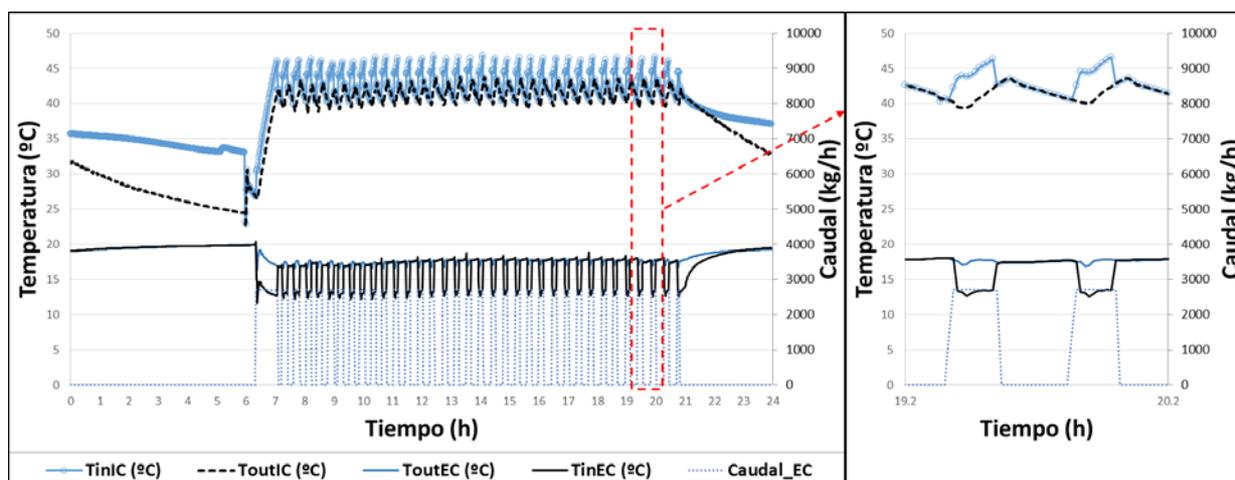


Figura 2: Evolución diaria de la temperatura del agua en el circuito hidráulico interno y externo.

Como se muestra en la Fig. 2, la temperatura del agua enviada al bucle exterior (intercambiador de calor enterrado), TinEC alcanza un valor mínimo de 12.3°C. La temperatura de retorno del intercambiador, ToutEC, toma valores alrededor de 17.5°C. En cuanto al circuito interno (bucle acoplado al edificio), se puede observar que la bomba de calor suministra agua caliente al sistema a una temperatura alrededor de 45°C. Cuando la bomba de calor se apaga, la temperatura de retorno ToutIC alcanza valores alrededor de 43°C. Un minuto más tarde, apaga la bomba de circulación externa y es por esto por lo que se igualan las temperaturas de entrada y salida en el bucle externo. Cuando la temperatura del agua de retorno del edificio ToutIC alcanza valores de 40°C, se enciende de nuevo la bomba de circulación externa y al cabo de un minuto se pone en marcha la bomba de calor. El sistema se apagará automáticamente desde las 21:00-6:00 horas todos los días.

### b. Modelo B2G

El modelo B2G de intercambiador enterrado se presenta en detalle en [1]. Este modelo se basa en el uso de una red térmica para la descripción de la transmisión de calor entre el intercambiador enterrado y el terreno circundante. En el caso del modelo B2G, el intercambiador modelado es un pozo con una sonda de polietileno en U, que se discretiza verticalmente en secciones como la observada en la Fig. 3a. Para cada sección del pozo se establece una red térmica con el menor número de nodos tal que garantice un correcto funcionamiento del modelo. En cada nodo se incluye una capacidad térmica que modela la inercia térmica de la zona que representa. En total, se tienen en cuenta 5 capacidades y 6 resistencias térmicas (modelo 5C6R-n, siendo n el número de secciones de la discretización vertical del pozo, tal y como se ve en la Fig. 3b).

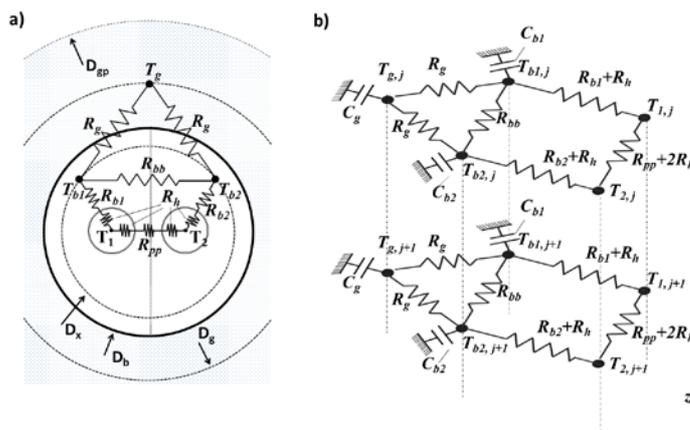


Figura 3: Red térmica considerada en el modelo B2G. a) modelo 2D . b) modelo 3D con discretización vertical

Las ecuaciones correspondientes a la red térmica utilizada se presentan a continuación. Para los nodos en las tuberías (ecuación 1) se ha tenido en cuenta el efecto del desplazamiento del agua a lo largo del pozo. Para los nodos en el relleno del pozo (ecuación 2) y en el terreno (ecuación 3) se ha considerado la transmisión de calor en sentido radial, despreciando la transmisión en dirección vertical, es decir, entre las distintas secciones del pozo.

$$\frac{\delta T_1(z)}{\delta t} = -v \frac{\delta T_1(z)}{\delta z} - \frac{1}{C_f} \left( \frac{T_1(z) - T_{b1}(z)}{R_{b1}} + \frac{T_1(z) - T_2(z)}{R_{pp}} \right) \quad (1)$$

$$C_{b1} \frac{\delta T_{b1}(z)}{\delta t} = \frac{T_1(z) - T_{b1}(z)}{R_{b1}} + \frac{T_{b1}(z) - T_{b2}(z)}{R_{bb}} - \frac{T_{b1}(z) - T_g(z)}{R_g} \quad (2)$$

$$C_g \frac{\delta T_g(z)}{\delta t} = \frac{T_{b1}(z) - T_g(z)}{R_g} + \frac{T_{b2}(z) - T_g(z)}{R_g} \quad (3)$$

Los parámetros del modelo son las diferentes capacidades y resistencias térmicas correspondientes a los nodos de la red térmica ( $R_b$ ,  $R_{pp}$ ,  $R_{bb}$ ,  $R_g$ ,  $C_f$ ,  $C_b$ ,  $C_g$ ) a las que se añade, en la ecuación 1, la velocidad de circulación del agua ( $v$ ). Estos parámetros se pueden determinar teniendo en cuenta las propiedades termodinámicas del terreno, del relleno del pozo y de las tuberías (una descripción exhaustiva del proceso de determinación de estos parámetros se puede encontrar en [1]).

- Las capacidades térmicas de los nodos del relleno del pozo ( $C_{b1}$  y  $C_{b2}$ ) se calculan teniendo en cuenta el volumen de cada zona del relleno.
- Las resistencias térmicas  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$ , que se suponen iguales, se obtienen a partir de la resistencia térmica global del pozo.
- Tanto la resistencia entre los nodos del relleno del pozo ( $R_{bb}$ ) como la resistencia entre los dos nodos de las tuberías ( $R_{pp}$ ) se obtienen asumiendo una transmisión de calor unidimensional entre ellos.
- La capacidad térmica del terreno ( $C_g$ ) se calcula en función del radio de penetración, que dependerá del tiempo de inyección de calor al terreno y de la difusividad térmica del mismo.
- La resistencia  $R_b$  se calcula considerando la transmisión de calor cilíndrica entre cada nodo del relleno del pozo y el del terreno.

### c. Simulación en TRNSYS

Para la simulación del modelo se utiliza el software TRNSYS, por su versatilidad y la posibilidad de implementar nuevos componentes en forma de *types* programados por el usuario. Así pues, el modelo B2G se ha programado en un *type* de TRNSYS en el que las resistencias y capacidades de la red térmica, así como el resto de parámetros del intercambiador enterrado, pueden ser fijados por el usuario. Este *type* se conecta al resto de elementos de la simulación a través de las temperaturas de entrada y salida del agua en la tubería del intercambiador.

Para el presente trabajo se utilizarán dos tipos de datos de entrada. En primer lugar, se utilizará la temperatura experimental del agua a la entrada de uno de los pozos de la instalación de la UPVLC como dato de partida para la simulación. En este caso, se comparará la temperatura simulada del agua a la salida del pozo con la experimental. Después, se modificará el dato de partida de la simulación, pasando a utilizar la carga inyectada al terreno en el pozo. De esta forma, se compararán tanto la temperatura a la entrada como a la salida del pozo con sus correspondientes valores experimentales, permitiendo validar el comportamiento del modelo B2G para la predicción de la evolución de las temperaturas a lo largo de un día de funcionamiento típico de la instalación. En ambos casos, se utilizará como caudal de agua el correspondiente a la medida experimental de la instalación.

## 7. Resultados y discusión

Para la validación del modelo con las dos simulaciones descritas en el apartado 2.3 se considerará la evolución de la temperatura del agua de entrada y salida en uno de los pozos del intercambiador enterrado a lo largo de un día típico de calefacción. Sin embargo, al analizar los resultados obtenidos, se debe tener en cuenta que el funcionamiento de la instalación se basa en ciclos de encendido y apagado de la bomba de calor. En los periodos de apagado de la misma, el caudal de agua en el pozo es nulo. Durante estos intervalos, la evolución de la temperatura medida por los sensores de temperatura de la instalación no refleja el comportamiento del pozo, sino que se debe a diversos factores que quedan fuera del ámbito del modelo B2G. Así pues, en la validación del modelo, se tendrá en cuenta únicamente la evolución de las temperaturas correspondiente a los intervalos en los que la bomba de calor está encendida. Respecto a los valores considerados en el modelo como propiedades térmicas del terreno, se ha tomado una conductividad efectiva de  $2.09 \text{ W/mK}$  y una capacidad calorífica volumétrica igual a  $3200 \text{ kJ/m}^3\text{K}$  tanto para el terreno como para el relleno del pozo.

### a. Temperatura como dato de partida

La Fig. 4 muestra la evolución de las temperaturas de entrada y salida en uno de los pozos del intercambiador enterrado. En este caso, se introducen como dato de entrada en el modelo las medidas experimentales de caudal y temperatura del agua de entrada, y se comparan los valores experimentales de la temperatura del agua de salida del intercambiador con aquellos calculados por el modelo B2G.

Tal y como se observa en la Fig. 4, el modelo B2G representa la evolución de la temperatura del agua de retorno del intercambiador enterrado ( $T_{out\_B2G}$ ) con suficiente precisión a lo largo del día, especialmente durante los ciclos de encendido de la bomba de circulación, siendo la desviación máxima encontrada del orden de  $0.3\text{K}$ . Sin embargo, durante los ciclos de apagado de la bomba de circulación, la temperatura obtenida en la simulación permanece prácticamente constante. Esto se debe al hecho de que la influencia de la temperatura ambiente en los nodos superiores del pozo no se ha tenido en cuenta, al encontrarse fuera del objetivo del modelo propuesto, ya que este fenómeno ocurre fuera del pozo. Por otra parte, cuando la bomba de circulación enciende de nuevo y existe flujo de agua circulando en el pozo, la temperatura del agua experimental  $T_{out\_exp}$  aumenta de repente, alcanzando valores muy similares a los obtenidos en la simulación. Esto es debido al desplazamiento del agua que permanecía parada durante el periodo de apagado, y cuya temperatura tiende a aproximarse a la del terreno. Se concluye por tanto, que las diferencias observadas en la evolución de la temperatura durante los periodos de apagado de la bomba de circulación no tienen influencia en la evolución de la temperatura una vez enciende la bomba de circulación, de modo que se comprueba que no es necesario haber tenido en cuenta estos periodos en la validación experimental del modelo.

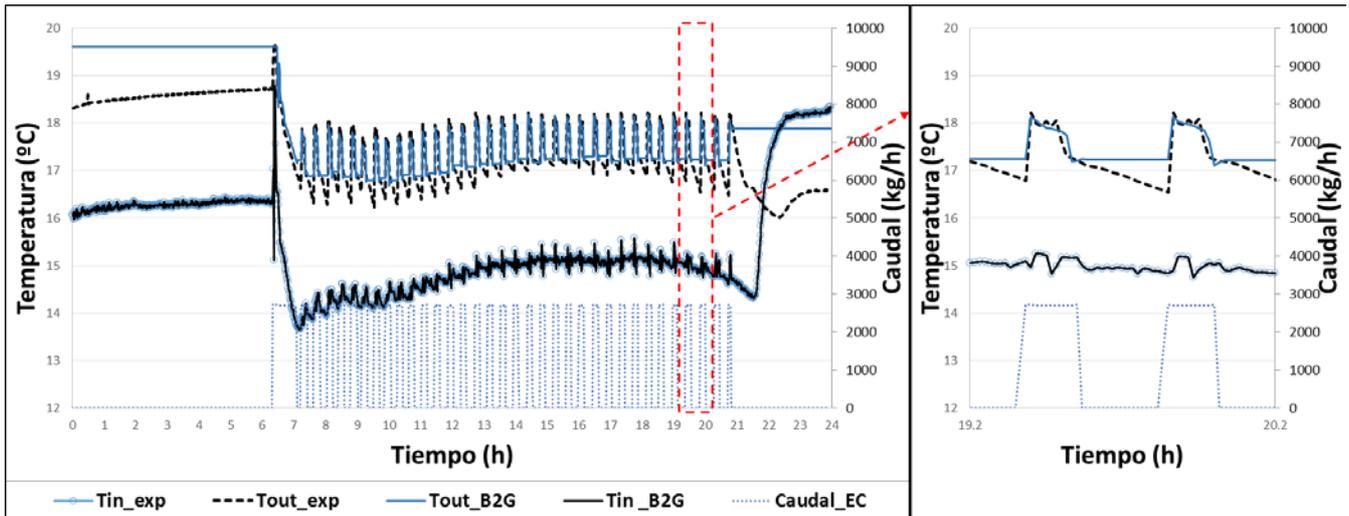


Figura 4: Validación experimental del modelo B2G considerando como dato de entrada la temperatura del agua de entrada al intercambiador enterrado

**b. Carga como dato de partida**

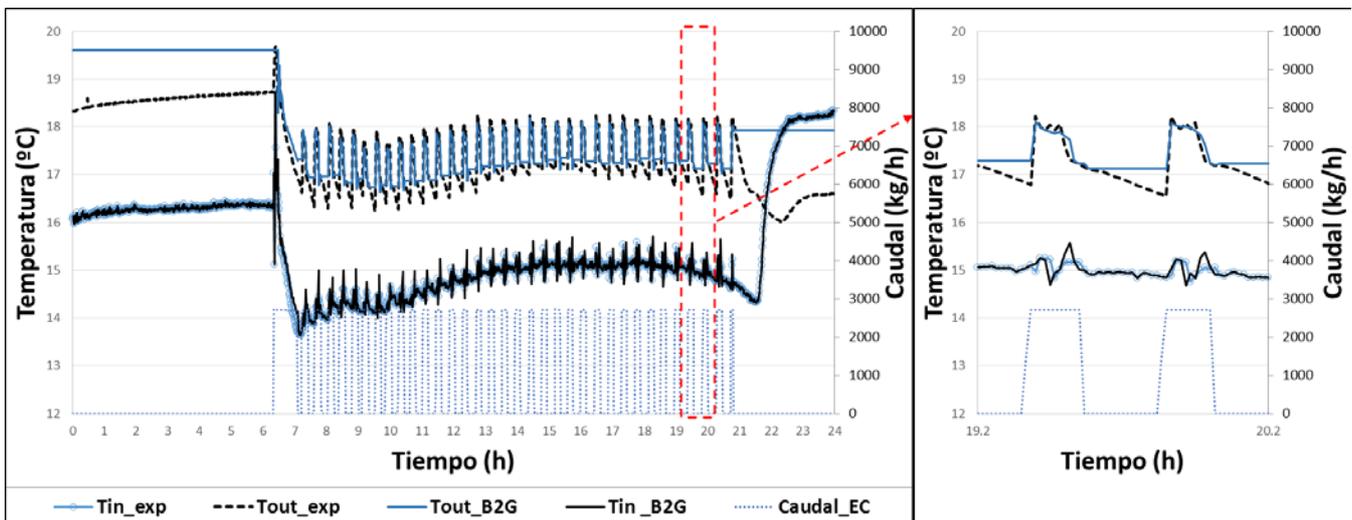


Figura 5: Validación experimental del modelo B2G considerando como dato de entrada la carga térmica inyectada en el intercambiador enterrado

La Fig. 5 muestra la evolución de las temperaturas de entrada y salida en el intercambiador enterrado. En este caso, se introducen como dato de entrada en el modelo, las medidas experimentales de caudal y carga térmica experimental inyectada en el terreno, y se comparan los valores experimentales de la temperatura del agua de entrada y salida del intercambiador, con aquellos calculados por el modelo B2G. Tal y como se observa en la Fig.5, el modelo es capaz de reproducir tanto la evolución de la temperatura del agua de entrada experimental como la del agua de salida. En este caso, se observa una mayor dispersión en la temperatura del agua de entrada calculada por el B2G en los periodos de arranque de la bomba de circulación externa, debido a que los valores de la carga calculada durante el transitorio difieren ligeramente de los pulsos de calor inyectado a nivel experimental durante ese primer instante de tiempo. Se comprueba finalmente que el modelo es efectivamente capaz de predecir la respuesta del terreno a partir de la carga inyectada para el periodo de tiempo requerido.

**8. Conclusiones**

En el presente trabajo se presenta la validación experimental del modelo dinámico de intercambiador de calor enterrado B2G, utilizando datos experimentales correspondientes a la instalación de la UPVLC. Para ello se realizan dos tipos de validación, utilizando como datos de entrada al modelo la

temperatura del agua a la entrada del intercambiador y, posteriormente, la carga térmica intercambiada con el terreno. Comparando los resultados con los datos experimentales se demuestra la capacidad del modelo para predecir el comportamiento dinámico del intercambiador enterrado tanto en la respuesta instantánea como a lo largo de un día de funcionamiento, siendo por tanto de utilidad integrarlo en un modelo global de la instalación que pueda asistir al desarrollo e implementación de estrategias de optimización energética en la misma.

## 9. Agradecimientos

Este trabajo se encuentra enmarcado en el proyecto europeo dentro del séptimo programa Marco “Advanced ground source heat pump systems for heating and cooling in Mediterranean climate” (GROUND-MED).

## 10. Referencias

- [1] RUIZ-CALVO, F. DE ROSA, M. ACUÑA, J. CORBERÁN, J.M. MONTAGUD, C. Experimental validation of a short-term Borehole-to-Ground (B2G) dynamic model. *Applied Energy*, 2014, vol. 140, pp. 210-223.
- [2] DE ROSA, M. RUIZ-CALVO, F. CORBERÁN, J.M. MONTAGUD, C. TAGLIAFICO, L.A. Borehole modelling: a comparison between a steady-state model and a novel dynamic model in a real ON/OFF operation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 547, n. 012008.
- [3] Environmental Protection Agency, [http://www.epa.gov/region1/eco/energy/re\\_geothermal.html](http://www.epa.gov/region1/eco/energy/re_geothermal.html) (27/03/2014).
- [4] URCHUEGUÍA, J.F. ZACARÉS, M. CORBERÁN, J.M. MONTERO, Á. MARTOS, J. WITTE, H. Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 2917-2923.
- [5] ESKILSON, P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. PhD Thesis 1987, University of Lund, Sweden.
- [6] YAVUZTURK, C. SPITLER, J.D. A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers. *ASHRAE Transactions*, 1999, vol. 105(2), pp. 475-485.