

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE CAPTADORES GEOTÉRMICOS MEDIANTE MODELOS IMPLEMENTADOS EN EL SOFTWARE TRNSYS PARA UNA BIBLIOTECA SITUADA EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE VIGO

EGUÍA OLLER, Pablo (1); FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Marta (1); GRANADA ALVAREZ, Enrique (1); ALONSO RODRIGUEZ, José M^a (1); PORTEIRO FRESCO, Jacobo (1)

peguia@uvigo.es

(1)Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Área de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de comprobación de los errores cometidos por los modelos de simulación del terreno y de los intercambiadores geotérmicos en un edificio del Campus de la Universidad de Vigo (Biblioteca de Ciencias del Mar).

Para la ejecución de las simulaciones transitorias se ha empleado el motor de cálculo de TRNSYS. Asimismo, para el cálculo del perfil de temperaturas del terreno, se emplea un modelo basado en el estudio de T. Kusuda y P.R. Achembach, donde la temperatura del terreno es función del momento del año y de la profundidad, así como de la difusividad térmica del suelo, la temperatura media anual de la superficie, la amplitud de la temperatura superficial anual y el momento de menor temperatura superficial del año. Se utiliza como modelo del intercambiador de calor con el terreno el desarrollado por Göram Hellström.

Los resultados obtenidos mediante simulación transitoria con TRNSYS son validados con los datos recopilados durante el año 2014 para el edificio de la biblioteca, el cual se encuentra calefactado mediante un sistema de bomba de calor geotérmica y suelo radiante. El sistema de producción térmica y el de captación geotérmica se encuentran monitorizados, proporcionando un registro de datos minutal.

Los resultados muestran un alto grado de concordancia, lo cual indica que TRNSYS es una herramienta eficaz para la simulación de este tipo de sistemas.

Palabras clave: Intercambiador geotérmico, simulación, calibración.

1. Introducción

Con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para cumplir los requisitos del Protocolo de Kioto, se fomenta el empleo de fuentes de energía renovables para la climatización de edificios, entre las que se encuentra la energía geotérmica. Las bombas de calor geotérmicas son uno de los sistemas más eficientes de producción de energía térmica, ya que aprovechan la inercia térmica del terreno, en lugar de aire o agua, como fuente de calor [1].

G. Hellström [2] desarrolló un modelo matemático para la simulación de sistemas de almacenamiento y transferencia de energía térmica en el terreno, el cual se emplea en este artículo para la simulación de captadores geotérmicos, y que ha sido ampliamente utilizado para el dimensionamiento y análisis de este tipo de instalaciones. T. Kusuda y P.R. Achembach [3] proporcionan un modelo para el cálculo del perfil de temperaturas del terreno, que en este artículo se utiliza para el cálculo del intercambio de energía térmica en los captadores geotérmicos.

Para la simulación de los modelos se utiliza el software TRNSYS [4]. Dicho software ha sido empleado con éxito en otros trabajos de simulación de sistemas de bomba de calor geotérmica en diferentes tipos de edificio [5] [6].

Genopt 3.0.1 [7], es el programa de optimización empleado en este artículo para la calibración de la simulación, porque minimiza la función de coste calculada con el programa de simulación.

Los captadores geotérmicos simulados se encuentran instalados en la Biblioteca de Ciencias del Mar, perteneciente al Campus de la Universidad de Vigo. La simulación se realiza en TRNSYS y se calibra mediante Genopt, obteniéndose unos resultados con alta concordancia.

2. Objetivo

El objetivo de este artículo es realizar la simulación de captadores geotérmicos verticales en doble U empleando el software TRNSYS y validando los resultados obtenidos a través de los datos recopilados en una instalación de bomba de calor geotérmica existente.

Se empleará un software de optimización para la calibración del modelo y se analizarán los resultados para comprobar si el proceso produce una reducción significativa del error cometido en la simulación.

3. Método de trabajo

3.1. Modelo de intercambiador geotérmico

El método de cálculo empleado para la simulación de los intercambiadores geotérmicos está basado en el sistema desarrollado por Göram Hellström. En los captadores geotérmicos existe transferencia de calor de dos tipos: por convección entre las tuberías y por conducción con el terreno. Según dicho método, la temperatura en el terreno que rodea a la tubería se calcula como superposición de tres partes: local, global y flujo estacionario.

TRNSYS proporciona dos tipos de intercambiadores geotérmicos verticales, los intercambiadores de tubería en U, como se ve en la figura 1a, pudiendo instalarse una o más tuberías por perforación, y los intercambiadores concéntricos, figura 1b, en los que el fluido desciende por la parte interior de la tubería y entra en contacto con el terreno al ascender por la parte exterior.

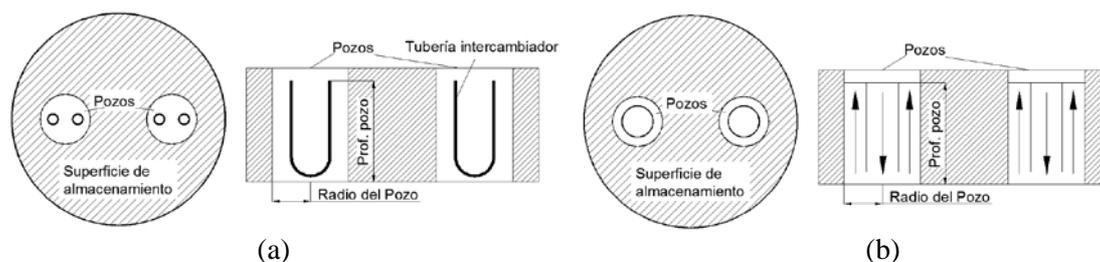


Figura 7. Disposición de captadores geotérmicos (a) tubería en U y (b) concéntricos

3.2. Modelado del sistema de captación geotérmica en TRNSYS

El motor de cálculo TRNSYS, desarrollado por la Universidad de Wiconsin, Madison, es un software de simulación de sistemas transitorios, formado por componentes o types que modelan el comportamiento de cada parte del sistema y que son interconectados de forma gráfica.

TRNSYS proporciona un modelo de intercambiador vertical con tubería en U. Dicho modelo calcula el intercambio de energía térmica según el método desarrollado por Göram Hellström y el perfil de temperaturas del terreno siguiendo el modelo basado en el estudio de T. Kusuda y P.R. Achembach.

Para caracterizar el intercambiador, es necesario definir parámetros del terreno, de geometría y disposición de los pozos y de los tubos en el pozo, así como las características del fluido caloportador, además de los datos meteorológicos de la ubicación. Se muestra en la tabla 1 los parámetros más relevantes.

Tabla 3: Parámetros de definición del modelo de intercambiador geotérmico.

Parámetro	Uds.
Disposición de pozos	
Número de pozos	
Profundidad de perforación	m
Separación entre pozos	m
Número de tuberías por pozo	
Conductividad térmica de la tubería	W/m·K
Fluido caloportador	
Calor específico del fluido	kJ/kg·K
Densidad del fluido	kg/m ³
Flujo por pozo	kg/h
Temperatura de entrada	°C
Terreno	
Conductividad térmica del material de relleno	W/m·K
Conductividad térmica del terreno	W/m·K
Capacidad calorífica del terreno	kJ/m ³ ·K
Temperatura inicial del terreno	°C

En la figura 2 se observa una imagen de la disposición de los tubos en cada pozo, y se indican aquellos parámetros que deben ser definidos para el funcionamiento del modelo: radio de la perforación, radio interior y exterior del tubo y distancia del tubo al centro del pozo, entre otros.

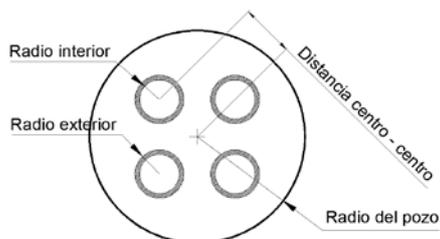


Figura 8. Datos geométricos del pozo.

La figura 3 muestra el diagrama de la simulación realizada en Simulation Studio de TRNSYS. En la parte central está el componente que simula los pozos geotérmicos. Se emplean tres Data readers para introducir los datos de entrada necesarios para la realización de la simulación, en formato de archivo de texto (.txt, .csv, etc.). Se calcula el error entre la temperatura de salida de los pozos real y simulada según las ecuaciones (1) y (2).

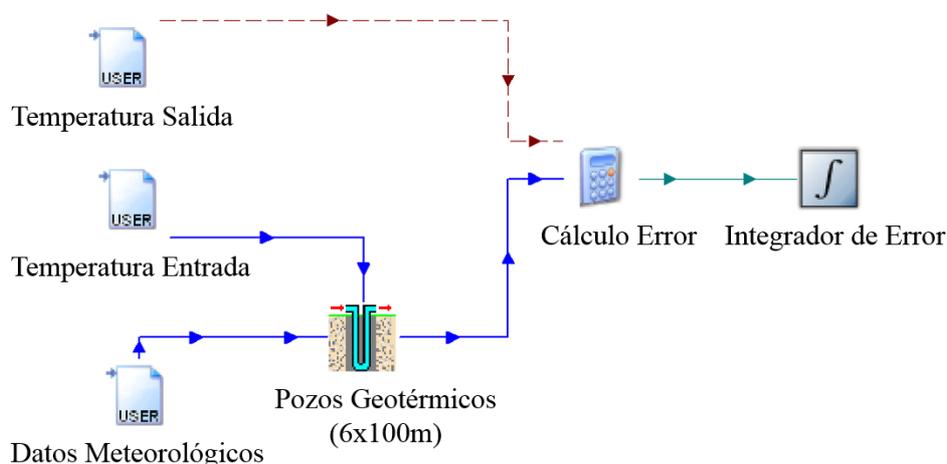


Figura 9. Esquema de simulación de captador geotérmico en Simulation Studio de TRNSYS

3.3. Cálculo del error

El error cometido en la simulación realizada se calcula comparando los datos reales de la temperatura de salida con los valores de temperatura de salida simulada, usando dos índices estadísticos, el error medio (MBE) y el error medio cuadrático (RMSE). Las ecuaciones (1) y (2) a continuación muestran cómo se calculan dichas medidas de error:

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{T_{sim} - T_{real}}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{sim} - T_{real})^2}{n}} \quad (2)$$

donde T_{sim} representa la temperatura simulada del fluido y T_{real} la temperatura registrada.

3.4. Calibración del modelo

Se emplea el software GenOpt como herramienta de optimización de la función de coste elegida, que en este caso se trata del RMSE definido en la ecuación (2). Este programa funciona mediante un algoritmo específico, modificando una serie de parámetros, los cuales pueden ser continuos o discretos, y minimizando el valor de la función de coste seleccionada.

Para el empleo de GenOpt es necesario definir una serie de archivos de texto en los que se indica la ubicación de la función que debe ser minimizada, los parámetros que se pueden variar y los límites de los mismos, y el algoritmo de cálculo que se va a emplear.

El algoritmo elegido es el GPS Hooke-Jeeves (“Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm”), un algoritmo híbrido de optimización global en el que se combinan las restricciones establecidas por el algoritmo de Hooke-Jeeves con una optimización de búsqueda de patrones. GenOpt parte de valores iniciales arbitrarios y continúa restringiendo dichos valores utilizando el algoritmo de GPS Hooke-Jeeves para obtener una mayor precisión en los resultados. Mediante este método se alcanza el mínimo global más rápido que con otros algoritmos debido a que durante la primera búsqueda arbitraria se aproxima a la solución más rápidamente.

Durante el proceso de optimización, GenOpt procede modificando las variables en estudio entre los límites preestablecidos, comparando si en cada iteración se reduce el coste de la función objetivo. En cada iteración, GenOpt ejecuta TRNSYS para realizar la simulación con el valor definido para cada parámetro y se calcula la función objetivo. En la figura 4 se representa el diagrama de funcionamiento de la calibración mediante GenOpt y TRNSYS.

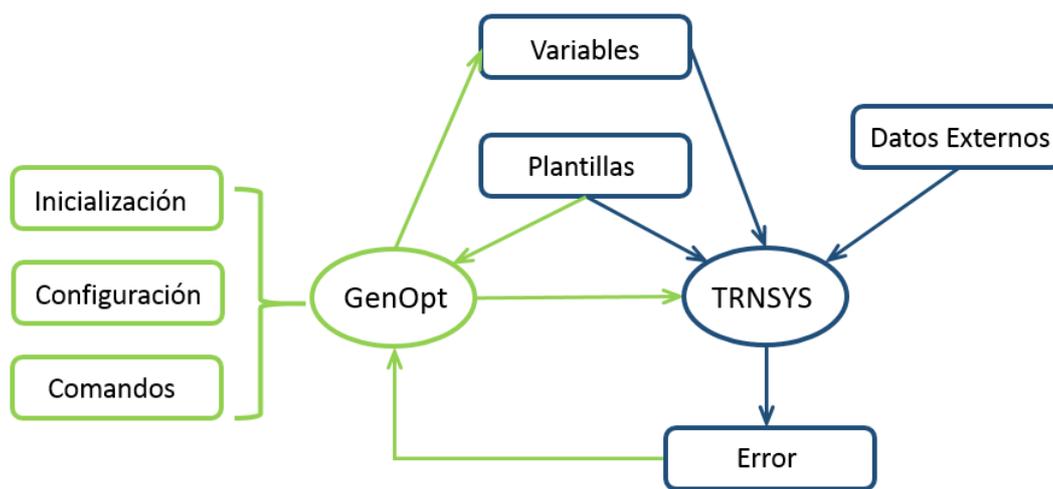


Figura 10. Diagrama de funcionamiento entre GenOpt y TRNSYS.

3.5. Descripción del edificio

El edificio en estudio es la biblioteca de la Facultad de Ciencias del Mar de la Universidad de Vigo, ubicada en el Campus Universitario de As Lagoas- Marcosende, en Vigo. Se trata de un edificio de tres plantas y 980 m² de superficie útil.

La instalación de climatización de la biblioteca está compuesta por suelo radiante en cada una de las plantas, siendo el sistema de producción de energía térmica una bomba de calor geotérmica reversible (modelo IZE 185 de CIATESA, con una capacidad nominal en calefacción de 49.1 kW y en refrigeración de 44.7 kW) con captadores geotérmicos.

Los captadores geotérmicos están dispuestos en 6 pozos, distribuidos en dos filas de 3 pozos cada una, y con una separación de 5 metros entre ellos. Los pozos tienen un diámetro de 140 mm y 100 m de profundidad y cuentan en su interior con un doble tubo en U de polietileno de 32 mm de diámetro. Se emplea bentonita como material para el relleno de la perforación.

El sistema de climatización funciona tanto en períodos de calefacción como cuando se requiere refrigeración, siendo los momentos en los que se realiza el cambio del modo de funcionamiento el 25 de mayo y el 29 de octubre. Según las características de diseño de los pozos geotérmicos, en modo de calefacción la temperatura del fluido caloportador es de 7 °C a la entrada y de 12 °C a la salida, y en modo refrigeración es de 30 °C a la entrada y 25 °C a la salida de los pozos.

El fluido caloportador que circula por el interior de los tubos es una solución de agua y propilenglicol al 20%. Esta mezcla circula entre la bomba de calor y el terreno impulsada con una bomba WILO STRATOS 40/1-12, con un caudal nominal de 8.450 m³/h, una potencia de 280 W y una caída de presión de 7.73 m.c.a.

En la figura 5 se ven los colectores de impulsión y retorno de los pozos con llaves de corte en cada tubería y caudalímetro en la impulsión. En la figura 6 se muestran las tuberías de impulsión y retorno de la instalación subterránea a la bomba de calor.



Figura 11. Colectores de pozos geotérmicos Figura 12. Tuberías de impulsión y retorno

El edificio está situado sobre un terreno compuesto por una formación rocosa homogénea (en referencia a las a las características térmicas), sin un importante flujo del agua subterránea, y tiene una conductividad térmica de $2,92 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y una resistencia térmica de la perforación de $0,089 \text{ K}\cdot\text{m/W}$, estimadas ambas propiedades en base al test de respuesta geotérmica realizado.

3.6. Monitorización de instalaciones

El edificio se encuentra monitorizado mediante un autómata Honeywell, modelo XL1000C500, con el que se registran en tiempo real una serie de parámetros, como la temperatura de las zonas, energía consumida y generada por los equipos de climatización, estado de equipos, bombas, etc., con el fin de poder realizar un control del funcionamiento de las instalaciones existentes.

Se dispone de datos registrados del año 2014, a excepción del período del 21/05 al 25/06, en el cual el autómata no estuvo operativo. La recopilación de los datos se realiza con un intervalo de 5 minutos.

Se encuentran instalados un total de 180 sensores distribuidos por todas las plantas del edificio, así como en la sala de máquinas. Para el análisis del funcionamiento de los pozos geotérmicos y su comparación con la simulación realizada que es objeto de este artículo, los datos de monitorización que han sido tenidos en cuenta son:

- Temperatura de entrada en los pozos
- Temperatura de salida en los pozos
- Estado de la bomba de los pozos

En la figura 6 se observa la disposición de los sensores de temperatura del fluido caloportador en la impulsión y el retorno de los pozos.

4. Resultados alcanzados

Se analizan en este apartado los resultados de las simulaciones realizadas, los cuales se representan en las gráficas de las figuras 7 y 8, junto con los valores reales recopilados de la instalación de los captadores geotérmicos de la Biblioteca de Ciencias. En estas figuras se muestran los valores de temperatura del fluido caloportador durante los períodos de 72 horas y 30 días respectivamente.

En las gráficas se muestran los datos registrados para el período de tiempo comprendido del 15 de noviembre al 14 de diciembre de 2014, y se comprueba que, con la bomba de los pozos encendida y el

sistema en modo de calefacción, la temperatura de entrada del fluido en los pozos oscila entre 7 y 11,5°C, saliendo aproximadamente a 12 °C, lo que supone un salto térmico en los pozos de 5 °C.

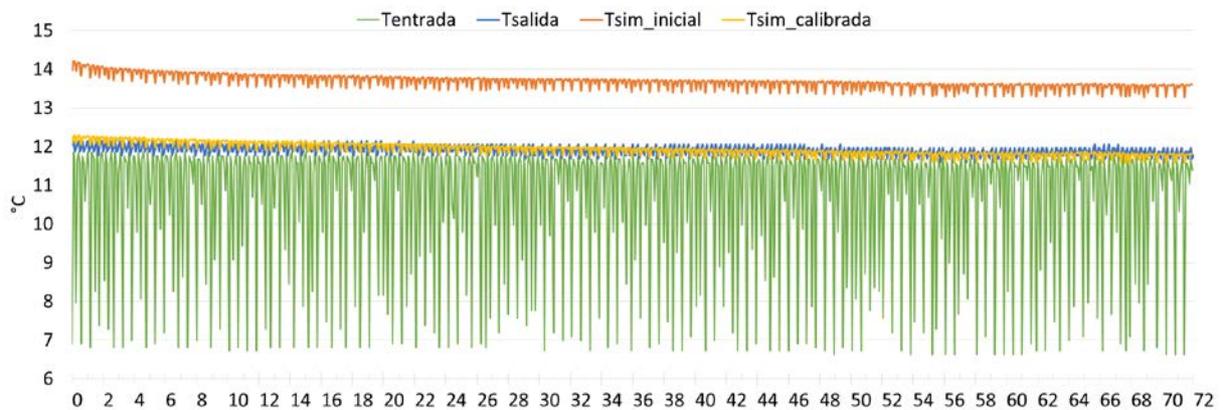


Figura 13. Temperaturas de Entrada y Salida [°C] del fluido en el intercambiador durante 72 horas

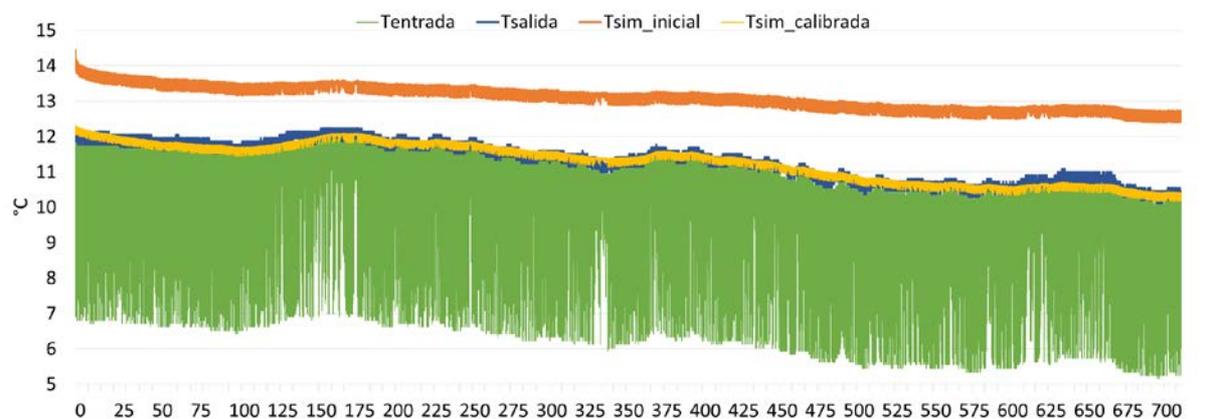


Figura 14. Temperaturas de Entrada y Salida [°C] del fluido en el intercambiador durante 30 días

Con los datos de la instalación se realiza una simulación inicial. Puesto que no todos los parámetros son conocidos, es necesario hacer una estimación de su valor. En las gráficas de las figuras 7 y 8 se puede ver como la temperatura de salida con estos valores se aproxima al dato real, aunque no se ve afectada por las fluctuaciones de la temperatura de entrada, y el salto térmico está en torno a 2°C superior a la realidad. En esta simulación, el RMSE cometido es del 186.7%.

En la tabla 2 se indican las variables empleadas en el proceso de calibración, con los valores iniciales y los obtenidos tras la calibración.

Tabla 4: Valores de los parámetros de calibración

Variable	Uds.	Valor inicial	Valor calibrado	Límite inferior	Límite superior
Conductividad térmica de la tubería	W/m·K	0.42	0.506	0.40	0.55
Flujo por pozo	kg/h	1408	1100	1000	1500
Conductividad térmica del relleno	W/m·K	0.94	0.842	0.2	1.2
Conductividad térmica del terreno	W/m·K	2.92	9.26	1	30
Capacidad calorífica del terreno	kJ/m ³ ·K	2400	39	1	2500
Temperatura inicial del terreno	°C	14.46	12.346	11.5	14.5

Tras el proceso de calibración, para el cual han sido necesarias 928 iteraciones, y un tiempo de 42 minutos de computación en un PC con procesador INTEL CORE I3 y 8 gigas de RAM, se reduce el error un 91.9%, siendo el error entre el valor de la temperatura de salida registrada y la simulada de

15.1%. En las figuras 7 y 8 se muestra el valor de la temperatura de salida obtenida con el modelo calibrado. En la figura 9 se compara dicha temperatura con el dato real, durante un período de 8 horas.

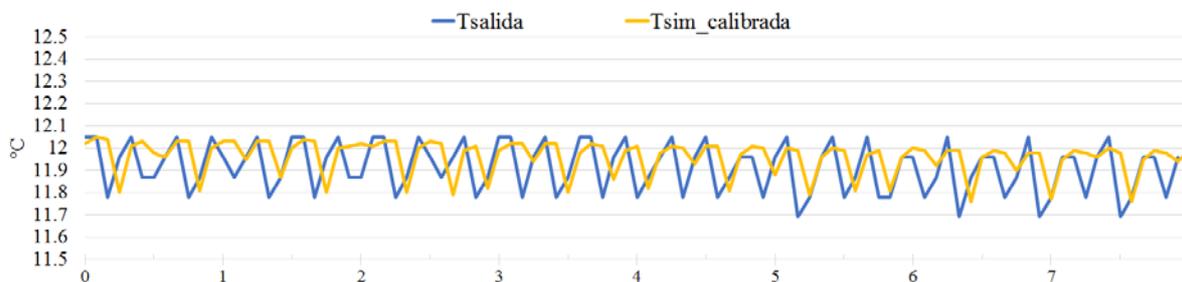


Figura 15. Temperaturas de Salida [°C] del fluido en el intercambiador durante 8 horas

5. Conclusiones

En este artículo se validan los resultados obtenidos al simular un sistema de captadores geotérmicos verticales con tubería de doble U mediante el software TRNSYS. Se comparan con los valores recogidos de la monitorización de un edificio situado en el Campus de la Universidad de Vigo, obteniéndose un error (RMSE) entre la temperatura simulada y la real de 15.1%.

Se calibra el modelo empleado a través del programa de optimización GenOpt con la variación de 6 parámetros, y se consigue una reducción del error cometido de 186.7% a 15.1%.

Se puede concluir por tanto que el software TRNSYS acoplado a GenOpt es una herramienta válida para la simulación de los pozos geotérmicos con alta precisión.

Futuros trabajos en relación con este artículo deberían ir orientados a la utilización del modelo del captador geotérmico, una vez calibrado, en un sistema de producción de energía con bomba de calor, con el objetivo de calibrar globalmente el sistema.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada a través del proyecto ITC- 20133033 TERESE3 subvencionado por el CDTI y Fondo Tecnológico -FEDER 2007-2013 Innterconecta apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad y Consejería de Economía e Industria a través Axencia Galega de Innovación (GAIN) de la Xunta de Galicia.

7. Referencias

- [1] 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*, vol. 49, no. 10, octubre 2008, pp. 2917-2923, ISSN 0196-8904.
- [2] HELLSTRÖM, Göran, *Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code*. 1989. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- [3] KUSUDA, T., ACHENBACH, P.R. *Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States*. 1965. ASHRAE Transactions 71 (Part 1), pp. 61–75.
- [4] TRNSYS. TRaNsient SYstems Simulation Program. [en línea]. University of Wisconsin, Madison. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/> [Consulta: febrero 2015]
- [5] MONTAGUD, Carla, CORBERÁN, José Miguel, RUIZ-CALVO, Félix, Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system, *Applied Energy*, vol. 109, septiembre 2013, pp. 328-336, ISSN 0306-2619.

- [6] ARTECONI, A., BRANDONI, C., ROSSI, G. and POLONARA, F., Experimental evaluation and dynamic simulation of a ground coupled heat pump for a commercial building. *Int. J. Energy Res.* 2013 doi: 10.1002/er.3059
- [7] GENOPT. Generic Optimization Program. Lawrence Berkeley National Laboratory, Universidad de California. <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/> [Consulta: febrero 2015]