

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE DOS MODELOS HÍBRIDOS DE SIMULACIÓN DE INTERCAMBIADORES ENTERRADOS VERTICALES PARA BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

ÁLVAREZ GÓMEZ, PASCUAL ⁽¹⁾; GONZÁLEZ GALLERO, FRANCISCO JAVIER ⁽¹⁾

RODRÍGUEZ MAESTRE, ISMAEL ⁽¹⁾, MENA BALADÉS, DANIEL

pascual.alvarez@uca.es

⁽¹⁾Universidad Cádiz, Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica

RESUMEN

Durante los últimos años se ha impulsado el uso de tecnologías eficientes como las bombas de calor geotérmicas para su uso en climatización de edificios debido a las políticas de ahorro energético y reducción de las emisiones de CO₂ [1]. Los programas de simulación energética de edificios que contemplan esta tecnología necesitan un correcto modelado del intercambiador de calor enterrado vertical para acoplar el comportamiento térmico del terreno con la bomba de calor geotérmica. Existen muchos modelos en la literatura que contemplan dicho fenómeno multidimensional transitorio [2].

En este artículo se estudian dos recientes modelos de simulación híbridos de un intercambiador de calor enterrado vertical con tubería simple en U, basados en analogías eléctricas para modelar las transferencias de calor en el interior de la perforación geotérmica, y factores de respuesta térmica (función-g) para estimar el flujo de calor con el terreno adyacente. Un primer modelo híbrido (RC1) consiste en un método unidimensional con transferencia térmica radial y el segundo modelo híbrido (RC2) se basa en una resolución bidimensional, permitiendo la discretización vertical del sistema completo (fluido, tubería, material de relleno y terreno) [3].

El artículo analiza los resultados de la validación experimental de dichos modelos, comparando sus resultados de temperaturas de salida del fluido con los datos adquiridos de la instalación experimental “GeoCool” que se encuentra completamente monitorizada durante un periodo de operación de 5 años [4].

Palabras clave: Intercambiador enterrado vertical, función g, modelos RC, geotermia.

1. Introducción

En la actualidad las políticas de ahorro energético y de reducción de las emisiones de CO₂ han impulsado la implantación de nuevas tecnologías eficientes, como las bombas de calor geotérmicas para su uso en climatización de edificios [1]. Así, el número de países que cuentan con instalaciones de bombas de calor geotérmicas se halla en continuo crecimiento [5].

Los programas de simulación energética de edificios que contemplan esta tecnología necesitan de un correcto modelado del intercambiador de calor enterrado (ICE) para acoplar el comportamiento térmico del terreno con la bomba de calor geotérmica. El modelo del intercambiador deberá caracterizar el comportamiento térmico de la interacción terreno-bomba de calor tendiendo a las nuevas exigencias de dichos programas de simulación como pueden ser la resolución simultánea del edificio y el sistema de climatización, intervalos de tiempos de simulación compatibles con los tiempos de respuesta de los equipos o la reducción de tiempos de computación sin comprometer la exactitud de los resultados [3].

Para este correcto modelado del comportamiento del terreno con el sistema de intercambiador de calor enterrado vertical existen desde simples soluciones analíticas unidimensionales como son la teoría de fuente lineal [6] o la teoría de fuente cilíndrica [7], pasando por importantes contribuciones como las ofrecidas por Eskilson [8], donde usando un modelo de dos dimensiones con diferencias finitas se determinan la temperatura de múltiples intercambiadores de calor, basándose en factores de respuestas de temperatura, llamados función-g. Yavuzturk [9] muestra una ampliación para periodo de tiempo corto (hasta pocos minutos) del conocido factor de respuesta de Eskilson. Además, existen interesantes modelos de resistencias y capacidades térmicas (RC) del ICE basados en la analogía eléctrica del proceso de conducción de calor [10], [11], [12]. La complejidad de estos modelos varía dependiendo del uso y configuración de las resistencias y capacidades.

En este trabajo se presenta un estudio de validación experimental de dos recientes modelos híbridos de un intercambiador de calor enterrado vertical con tubería simple en U [3]. Estos modelos se basan en un modelo de resistencias y capacidades térmicas para modelar las transferencias de calor en el interior de la perforación geotérmica y en los factores de respuesta térmica (función-g) para estimar el flujo de calor con el terreno adyacente. El primer modelo híbrido (RC1) [13] consiste en un método unidimensional con transferencia térmica radial y el segundo modelo híbrido (RC2) [14] se basa en una resolución bidimensional, permitiendo la discretización vertical del sistema completo (fluido, tubería, material de relleno y terreno).

Para la realización de la validación experimental se comparan los resultados obtenidos de la temperatura de salida del fluido por ambos modelos híbridos RC con los datos adquiridos de la instalación experimental "GeoCool" que se encuentra completamente monitorizada durante un periodo de operación de 5 años [4].

2. Modelos de simulación

En el apartado 2.1 y 2.2 se describen los dos modelos híbridos RC que se proceden a validar experimentalmente. Además, el apartado 2.3 muestra la estimación de la función-g .

2.1 Modelo híbrido RC1

El modelo híbrido RC1 [13] consiste en un modelo térmico unidimensional (radial), desarrollado para modelar intercambiadores de calor enterrados con una única tubería en forma de U. El modelo híbrido permite modelar diferentes geometrías de la perforación y admite modificaciones en las propiedades físicas y térmicas de los siguientes componentes: el fluido, la tubería, el material de relleno y el terreno circundante.

El modelo utiliza una formulación resisto-capacitiva para evaluar las transferencias de calor dentro de la perforación, con un nodo capacitivo en el fluido y otro en el interior de la perforación. Por lo tanto, se tiene en cuenta la inercia térmica, permitiendo el cálculo de la respuesta térmica del ICE ante

cambios rápidos del flujo de inyección-extracción de calor. La respuesta térmica del terreno se evalúa mediante modelos de función-g, para paso de tiempo corto y paso de tiempo largo.

Las principales hipótesis de este modelo son descritas a continuación. El terreno heterogéneo circundante a la perforación es reemplazado por un suelo homogéneo, con propiedades de transferencia térmica promediadas, considerando una conductividad y difusividad media. Estos valores medios se obtienen de datos experimentales. Para hacer el problema unidimensional, se reemplaza las dos tuberías del ICE por una única tubería con un radio efectivo. De esta manera, aunque el modelo no puede dar cuenta de la conducción de calor vertical en todo el dominio de simulación, la simetría de la configuración conduce a una ecuación de energía unidimensional en coordenadas cilíndricas. La condición de contorno del terreno es una condición de contorno de temperatura impuesta (T_G). Finalmente, el principio de superposición es utilizado para considerar la variación del flujo de calor inyectado o extraído.

La sección longitudinal y transversal del ICE se muestran en la Figura 1, indicándose los parámetros geométricos: profundidad perforación (H), radios tuberías (r_{pin} y r_{pout}), espacio entre tubos (d) y radio de la perforación (r_b).

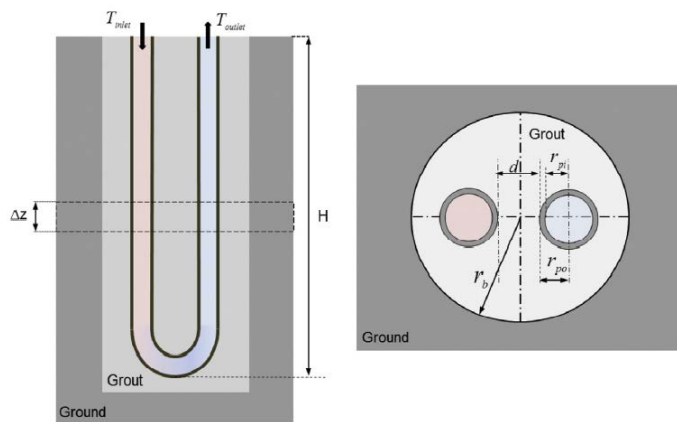


Figura 1. Configuración del ICE (con tubería en U)

La Figura 2 muestra la descripción del modelo híbrido RC1 y sus parámetros físicos principales. Se consideran seis nodos térmicos para caracterizar la temperatura media del fluido (T_f), temperaturas interior y exterior de la pared de la tubería (T_{pf} y T_{pg}), temperatura del material de relleno (T_g), temperatura de la superficie exterior de la perforación (T_b) y temperatura de terreno estacionaria (T_G). La temperatura media del fluido se ha definido como la temperatura media entre la temperatura de entrada y salida del fluido. Además, se muestran las diferentes resistencias térmicas en cada zona del intercambiador de calor (fluido, tubería y material de relleno) y las capacidades térmicas equivalentes del fluido (C_f) y del material de relleno (C_g).

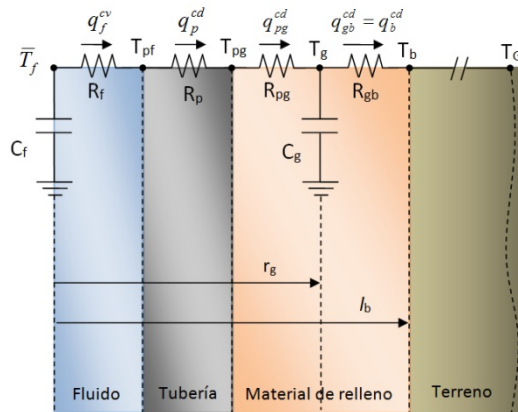


Figura 2. Descripción del modelo híbrido RC1

En la Tabla 1 se muestran los parámetros sensibles para el ajuste correcto del modelo RC1

Parámetros	Descripción	Valores
l_b	Longitud de trayectoria efectiva de conducción de calor	Mínimo
γ	Factor ponderación inercia térmica	1

Tabla 1. Parámetros sensibles del modelo RC1.

2.2 Modelo híbrido RC2

El modelo simplificado RC2 es un modelo térmico bidimensional (radial y vertical) que se presenta como una mejora del modelo unidimensional RC1, ya que permite modelar el flujo de fluido que circula por el interior de las tuberías y estimar los perfiles de temperatura con respecto a la profundidad del ICE. Además, permite analizar el efecto del gradiente térmico vertical en el terreno circundante.

Nuevamente, el modelo híbrido RC2 utiliza una formulación resisto-capacitiva para las transferencias de calor dentro de la perforación. La perforación es dividida en dominios (fluido, tubería y material de relleno), para los que se definen las resistencias térmicas necesarias para la correcta evaluación de las transferencias térmicas internas de cada material. Además, se contempla la inercia térmica del fluido y del material de relleno, incluyendo un nodo capacitivo para cada uno. Igualmente, la respuesta térmica del terreno se estima mediante la utilización de funciones-g, para paso de tiempo corto y largo.

La principal diferencia con respecto al modelo híbrido RC1 es la discretización vertical de todos los dominios (fluido, tuberías, material de relleno y terreno). Esta discretización vertical en capas, permite realizar un estudio más detallado del comportamiento del fluido dentro de la tubería, pudiéndose evaluar los perfiles de temperatura del fluido de bajada y de subida para cualquier instante de tiempo. Al mismo tiempo, se mejora la versatilidad del modelo, permitiéndose que el terreno se pueda asumir como un medio heterogéneo, dividiéndose en distintos estratos horizontales. Además, se permite la posibilidad de introducir un perfil vertical de temperatura inicial ($T_{G,i}$), en lugar de usar una temperatura inicial uniforme para todo el dominio del terreno, como sucedía en el modelo anterior.

La Figura 3 muestra el esquema propuesto para el modelo RC2. Por cada capa i , se disponen de diez nodos térmicos que representan: temperaturas del fluido ($T_{f,d}^{i,j}$ y $T_{f,u}^{i,j}$), temperaturas de la superficie de la tubería ($T_{pi,d}^{i,j}$, $T_{po,d}^{i,j}$, $T_{pi,u}^{i,j}$ y $T_{po,u}^{i,j}$), temperaturas del material de relleno ($T_{g,d}^{i,j}$ y $T_{g,u}^{i,j}$), temperatura de la perforación $T_b^{i,j}$, temperatura del terreno estacionaria (T_G^i). Resistencias térmicas del fluido ($R_{fp,d}^i$ y $R_{fp,u}^i$), resistencia tuberías ($R_{p,d}^i$ y $R_{p,u}^i$) y resistencias del material de relleno ($R_{pg,d}^i$, $R_{gb,d}^i$, $R_{pg,u}^i$ y $R_{gb,u}^i$). Además de incluir las capacidades térmicas del fluido ($C_{f,d}^i$ y $C_{f,u}^i$) y del material de relleno ($C_{g,d}^i$ y $C_{g,u}^i$)

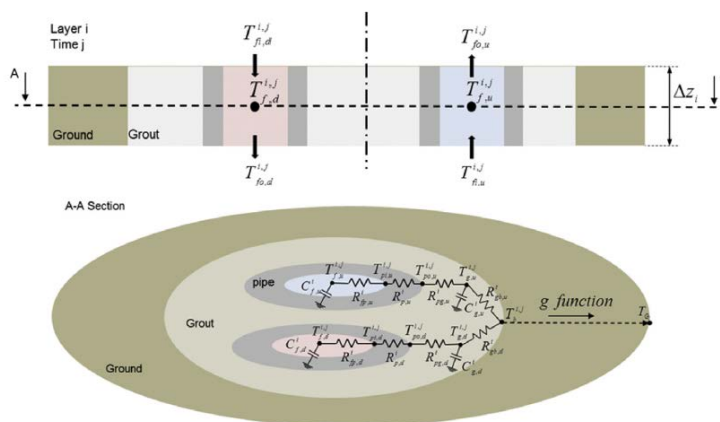


Figura 3. Descripción del modelo híbrido RC2

Este modelo RC asume que el valor de las dos resistencias térmicas ($C_{g,d}^i$ y $C_{g,u}^i$) dispuestas a cada lado del nodo capacitivo en el material de relleno dependen de la longitud de la trayectoria efectiva de conducción de calor (l_b) y de los volúmenes de material a cada lado del nodo capacitivo. Así que se hace relevante el uso de un parámetro de ajuste (β) que describe la relación de volúmenes de material de relleno según la posición de ese nodo capacitivo.

Este modelo propone unos parámetros sensibles para el ajuste correcto del modelo que son mostrados en la Tabla 2:

Parámetros	Descripción	Valores
Δz	Espesor de la capa de discretización	10 m
l_b	Longitud de trayectoria efectiva de conducción de calor	Máximo
β	Relación de volúmenes de material de relleno	0.25

Tabla 2. Parámetros sensibles del modelo RC2.

2.3 Estimación de la función-g

Siguiendo el método descrito por Yavuzturk [9] la respuesta de la temperatura en la pared de la perforación a un impulso de calor se estima mediante un modelado de referencia. Después, la respuesta de temperatura se convierte en una serie adimensional de factores de respuesta (función-g). En la Figura 4 se muestra la función-g y su ajuste polinómico.

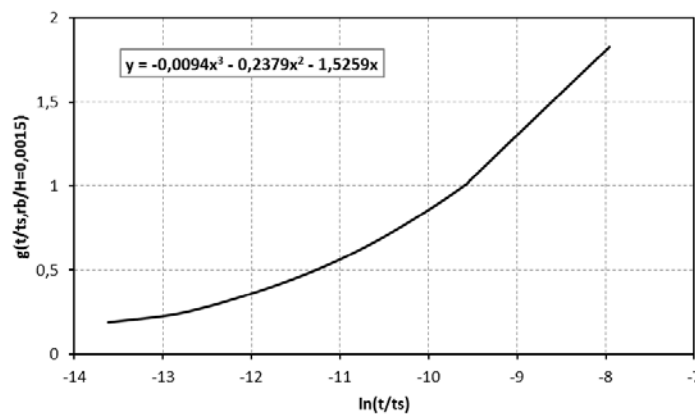


Figura 4. Función-g y ajuste polinómico

3. Validación experimental

Este apartado desarrolla el estudio de la validación experimental de los modelos RC propuestos mediante la comparación de los resultados de la temperatura de salida del fluido con los datos obtenidos del ensayo experimental descrito en el apartado 3.1.

3.1 Descripción del ensayo experimental

La instalación experimental “GeoCool” [4] está situada en la Universidad Politécnica de Valencia. La planta permite climatizar un área aproximada de 250 m². Se utiliza una bomba de calor reversible agua-agua. La instalación se encuentra totalmente monitorizada obteniendo datos desde el 2005, durante un periodo de operación de 5 años.

El intercambiador de calor con el terreno consiste en seis perforaciones verticales, conectadas mediante una configuración en paralelo. Las perforaciones forman una cuadrícula de 2x3 de 18 m² y cada perforación presenta una profundidad de 50m.

La Tabla 3 muestra la configuración y propiedades térmicas de cada dominio del ICE para obtener un correcto modelado del ensayo experimental.

Propiedades	Símbolo	Unidades	Valores
Profundidad de perforación	H	[m]	50
Radio perforación	r_b	[mm]	75
Espacio entre perforaciones	s	[m]	3
Radio interior tubería	r_{pin}	[mm]	12.7
Radio exterior tubería	r_{pout}	[mm]	16
Espacio entre tubos	d	[mm]	70
Conductividad térmica tubería	k_p	[W/mK]	0.40
Capacidad térmica tubería	c_{pp}	[J/m ³ K]	$1.81 \cdot 10^6$
Temperatura estable del terreno	T_G	[°C]	18.5
Conductividad térmica terreno	k_p	[W/mK]	2
Capacidad térmica terreno	c_{pp}	[J/m ³ K]	$2.5 \cdot 10^6$
Conductividad térmica material de relleno	k_p	[W/mK]	2
Capacidad térmica material de relleno	c_{pp}	[J/m ³ K]	$2.5 \cdot 10^6$

Tabla 3. Configuración y propiedades térmicas del ICE.

Para esta validación experimental se ha optado por el día 13 de septiembre de 2005 que pertenece al año de comienzo del funcionamiento del sistema y es el primer día de arranque después de 47 días de parada de operación de la bomba de calor geotérmica, consiguiéndose de esta forma que el suelo no se encuentre saturado térmicamente por el funcionamiento continuo de la inyección/extracción de calor del terreno. Este día en concreto la instalación está funcionando en modo refrigeración desde las 7:00 a las 22:00 adquiriéndose datos de la temperatura de salida del fluido a cada periodo de 1 minuto. También se dispone de medidores de temperatura a diferentes profundidades 2.5, 10, 17.5, 25, 32.5, 40 y 47.5 m. De la base de datos del experimento [4] se obtiene los flujos máxicos y temperaturas de entrada del fluido que se utilizan de condición de contorno en los modelos RC.

Por último, se exponen los parámetros sensibles de los modelos RC adquiridos para las simulaciones del ensayo experimental:

- Modelo RC1: el parámetro $l_{b \text{ min}}=24$ mm y se asume la capacidad térmica máxima en el material de relleno.
- Modelo RC2: el parámetro $l_{b \text{ max}}=90.7$ mm, $\Delta z=10$ m y $\beta=0.25$.

3.2 Modelo CFD

Con la finalidad de aumentar y mejorar los resultados obtenidos en el presente trabajo se recurre a la utilización de un modelo de referencia numérica CFD (Ansys-CFX). La simulación consiste en un método numérico basado en elementos finitos que permite resolver el sistema completo del intercambiador de calor, realizando una alta discretización de los componentes (tubo en forma de U, el fluido que circula por el interior, el material de relleno y el terreno de alrededor).

Se realizan todas las etapas características de un modelado CFD: realización de la geometría, discretización del mallado, pre-procesado de los datos y condiciones de contorno, resolución de las ecuaciones que gobiernan el sistema y post-procesado de los resultados obtenidos.

Estos resultados servirán para compararlos con los obtenidos mediante los dos modelos simplificados RC y así afianzar la respuesta de la validación experimental.

3.3 Resultados Validación Experimental

La validación experimental se realiza mediante el análisis de resultados que se obtiene de comparar los resultados de cada uno de los modelos RC con los datos adquiridos del ensayo experimental descrito en el apartado 3.1. De esta forma se puede observar el análisis de errores cuadráticos medios (RMSE) de la temperatura de salida del fluido que se muestran en la siguiente Tabla 4.

Error	Modelo RC1	Modelo RC2	Modelo CFD
RMSE (T_{out}) [°C]	2.234	0.489	0.366

Tabla 4. Valores RMSE de la temperatura de salida del fluido.

Se puede deducir de los errores RMSE mostrados en la Tabla 4 que el comportamiento del Modelo RC2 es más adecuado que el Modelo RC1, mostrando valores RMSE inferiores a 0.5 °C.

En las siguientes graficas se puede observar el comportamiento de los modelos RC para la simulación del ensayo experimental antes descrito. Se muestran los resultados durante las distintas etapas de arranque de la bomba de calor. Para una mejor interpretación y resolución de las gráficas el periodo de operación de 15 horas se ha dividido en 2 fracciones de tiempo, quedando las gráficas de 7:00 a 14:30 y de 14:30 a 22:00.

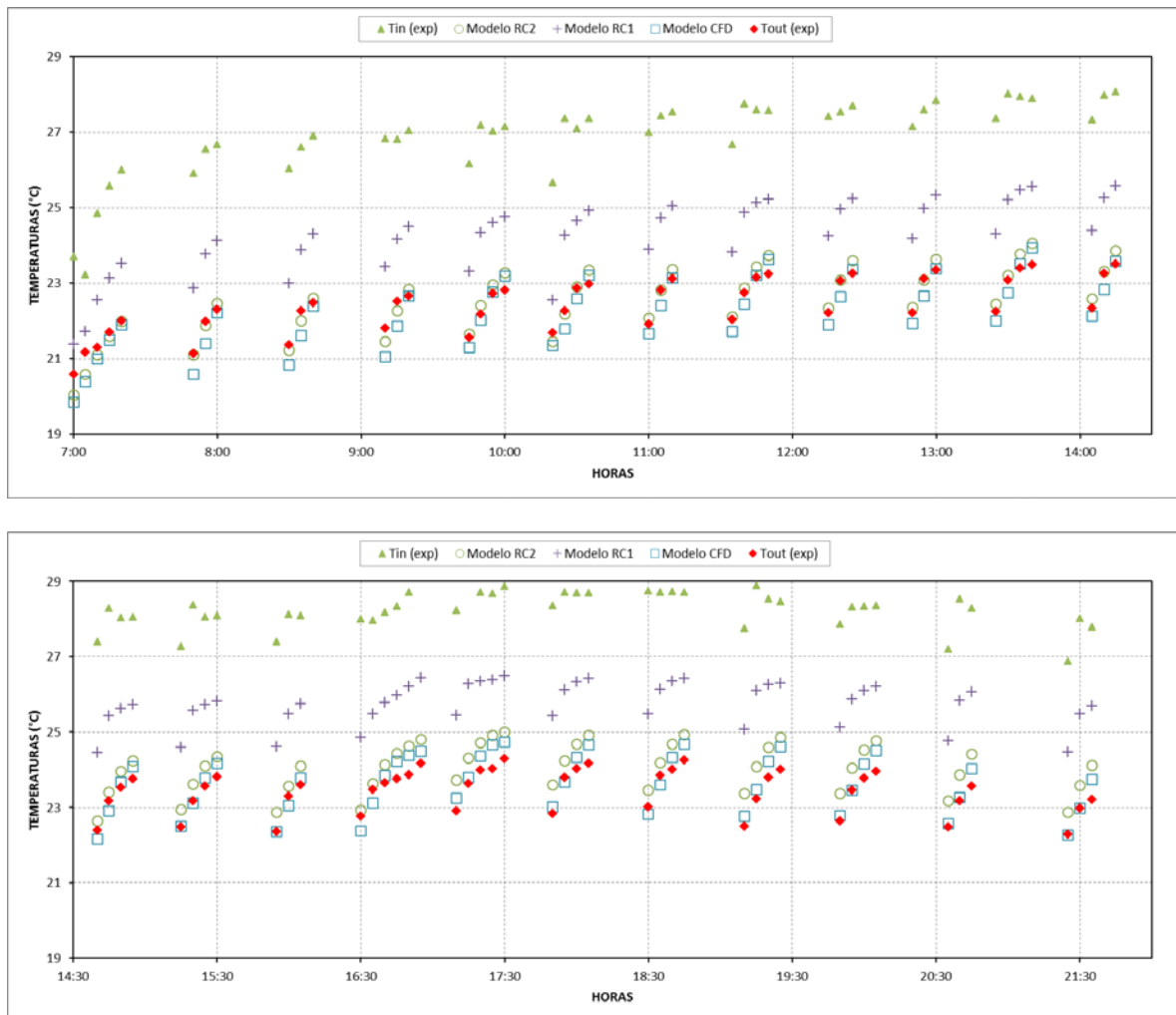


Figura 5. Análisis de la respuesta de la temperatura de salida del fluido del Modelo RC1, RC2 y CFD comparado con los datos experimentales T_{out} (exp). Además, se muestra la temperatura de entrada T_{in} (exp).

Nuevamente se puede observar unos resultados muy adecuados del Modelo RC2 que asume los periodos sucesivos de arranques y paradas del sistema con un mejor ajuste que el modelo RC1. Además, comparando el Modelo híbrido RC2 con el modelo numérico CFD, que es mucho más complejo, se presentan resultados muy aceptables.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta un estudio de la validación experimental realizada a dos recientes modelos de simulación de intercambiador de calor enterrado vertical con tubería única en forma de U. El primer modelo (RC1) se basa en una metodología híbrida unidimensional que presenta una configuración de resistencias y capacidades térmicas para definir las transferencias térmicas del interior de la perforación y una función de respuesta térmica adimensional para estimar el flujo de calor del terreno. El segundo modelo (RC2) se presenta como una mejora del modelo anterior, basándose en una metodología bidimensional que asume la discretización vertical del ICE.

Estos modelos se han simulado según las características y propiedades del ensayo experimental de la instalación "GeoCool" de la Universidad Politécnica de Valencia. Se ha realizado un análisis de los modelos para un día en concreto que la instalación está funcionando en modo refrigeración durante 15 horas y se entiende que el suelo no presenta saturación térmica debida a la sucesiva inyección o extracción de calor.

Los resultados obtenidos en el proceso de validación experimental muestra una respuesta muy satisfactoria del modelo RC2 con errores cuadráticos medios en la temperatura de salida del fluido inferiores a 0.5°C. El modelo RC1 presenta unos errores asumibles que no superan 2.3°C.

Se puede concluir que los modelos resultan validados experimentalmente ya que muestran un correcto y adecuado comportamiento de los resultados de su simulación, siendo el modelo RC2 el que mejor ajusta su comportamiento ante los sucesivos arranques y paradas de la bomba de calor geotérmica.

5. Referencias

- [1] IDAE, "Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica," Ahorro y Eficiencia Energética en Edificación, Madrid, 2010.
- [2] H. Yang, P. Cui and Z. Fang, "Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems," vol. 87, pp. 16-27, 2010.
- [3] P. Álvarez Gómez, Modelo de simulación de intercambiador de calor enterrado vertical para bombas de calor geotérmicas, Universidad de Cádiz: Tesis Doctoral, 2014.
- [4] F. Ruiz Calvo y C. Montagud, «Reference data sets for validating GSHP system models and analyzing performance parameters based on a five-year operation period,» Geothermics, vol. 51, pp. 417-428, 2014.
- [5] W. John, H. Derek and L. Tonya, "Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review," Geothermics, vol. 40, no. 3, pp. 159-180, 2011.
- [6] W. Kelvin, "Mathematical and Physical Papers," vol. 1, 1882.
- [7] H. Carslaw and J. Jaeger, Conduction of heat in solids, Oxford UK: Clarendon Press, 1946.
- [8] P. Eskilson, Thermal analysis of heat extraction boreholes, Lund, Sweden: Doctoral thesis, University of Lund, Dept. of Mathematics, 1987.
- [9] C. Yavuzturk, Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems. Ph. D. thesis, Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University, 1999.
- [10] M. De Carli, M. Tonon, A. Zarrella and R. Zecchin, "A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers," Renewable Energy, vol. 35, pp. 1537-1550, 2010.

- [11] D. Bauer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen and H. Diersch, "Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers," *International Journal of Energy Research*, vol. 35, pp. 312-320, 2011.
- [12] D. Bauer, W. Heidemann and H. Diersch, "Transient 3D analysis of borehole heat exchangers modeling," *Geothermics*, vol. 40, pp. 250-260, 2011.
- [13] I. Rodríguez Maestre, F. J. González Gallero, P. Álvarez Gómez and J. D. Mena Baladés, "Performance assessment of a simplified hybrid model for a vertical ground heat exchanger," *Energy and Buildings*, no. 66, pp. 437-444, 2013.
- [14] I. Rodríguez Maestre, F. J. González Gallero, P. Álvarez Gómez and L. Perez-Lombard, "A new RC and g-function hybrid model to simulate vertical ground heat exchangers," *Renewable Energy*, no. 78, pp. 631-642, 2015.