

Desarrollo de equipo para la realización de test de respuesta térmica del terreno (TRT) en instalaciones geotérmicas



DEVELOPMENT OF DEVICE FOR GROUND THERMAL RESPONSE TESTS (TRT) IN GEOTHERMAL INSTALLATIONS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6943> | Recibido: 29/07/2013 • Aceptado: 10/12/2013

Pedro J. Casanova-Peláez¹, José M. Palomar-Carnicero²,
 Rafael López-García², Fernando Cruz-Peragón²

¹ UNIVERSIDAD DE JAÉN. Dpto. de Ingeniería Electrónica y Automática. Campus Las Lagunillas, s/n. Edif. A-3 - 23071 Jaén. Tfno: + 34 953 212805. casanova@ujaen.es

² UNIVERSIDAD DE JAÉN. Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Las Lagunillas, s/n - 23071 Jaén. Tfno: + 34 953 212805

RESUMEN

La utilización del terreno como fuente térmica en instalaciones de climatización se ha convertido en un recurso energético renovable cada vez más en auge gracias a que mantiene una temperatura estable, tanto en invierno como en verano, a partir de una determinada profundidad. Para el diseño de instalaciones que aprovechen este recurso es necesario conocer las características térmicas del suelo (conductividad, difusividad y temperatura del suelo inalterado, entre otras), a partir de las cuales se dimensiona el intercambiador geotérmico (profundidad, diámetro y número de sondas).

En este sentido, se ha desarrollado y construido un equipo que permite realizar ensayos de respuesta térmica del terreno (TRT), para conocer las características del suelo anteriormente mencionadas. En este trabajo se describe el diseño del equipo y el software de cálculo que obtiene los resultados requeridos.

Palabras clave: geotermia, climatización, energías renovables, edificación sostenible, bomba de calor geotérmica.

ABSTRACT

• The use of the ground as heat source in air-conditioning has become a renewable energy resource increasingly booming since it maintains a stable temperature in both winter and summer, from a certain depth. For the design of facilities that take advantage of this resource is necessary to know the thermal characteristics of the ground (conductivity, diffusivity and undisturbed ground temperature, etc.), from them the ground heat exchanger (GHE) is dimensioned (depth, diameter and number of boreholes).

In this sense, it has been developed and built a system that allows make ground thermal response tests (TRT), to obtain ground characteristics mentioned above. This paper describes the design of the equipment and the computing software that obtains the required results.

• **Key words:** geothermal, HVAC, renewable energy, sustainable building, ground source heat pump.

1. INTRODUCCIÓN

La propuesta 20-20-20 de la Unión Europea [1] traduce los objetivos estratégicos en materia de energía de la Unión Europea destinados a combatir el cambio climático, incrementar la seguridad de suministro energético minimizando la dependencia del exterior y reducir el coste de la factura energética. En ella se pretende lograr una reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero, llegar a un consumo final del 20% procedente de energías renovables y ahorrar otro 20% en la demanda futura de energía para el año 2020. Por ello, la utilización de la energía procedente de fuentes renovables desaceleraría el cambio climático, al disminuir consecuentemente las emisiones de CO₂. Dentro de las energías renovables, la energía geotérmica es una de las que está por desarrollar [2].

El sector energético en el ámbito de la edificación no ha pasado desapercibido para estas políticas, estableciéndose medidas para una mejora en la demanda y consumos de energía en edificios [3], lo que se asocia directamente a los sistemas de climatización. En este sentido, la energía que consumen las familias se acerca al 30% del consumo energético total en España, y se reparte entre un 18% en la vivienda y un 12% en el del coche. Un 44 % de la demanda de energía en el hogar se corresponde con la climatización, y el 20% con la producción de agua caliente sanitaria (en adelante ACS) [4].

El Gobierno de España a través del Ministerio de la Vivienda ha dispuesto el nuevo *Código Técnico de la Edificación*, estableciéndose medidas para la certificación de edificios de nueva construcción [5], y cuya normativa se ha actualizado recientemente ampliando aquella para edificios existentes [6]. Con estos antecedentes, un paso más hacia la edificación sostenible implicaría el uso de fuentes renovables para la producción de frío: por un lado, ampliaría el aprovechamiento de fuentes renovables a una aplicación adicional, aparte de las ya existentes para producción exclusiva de calor o electricidad, y por otra parte, modificaría la concepción de producción de calor en invierno con fuentes renovables al utilizar un ciclo frigorífico con bomba de calor [7].

Hasta la fecha, los sistemas de climatización (calefacción en invierno, refrigeración en verano) utilizan equipos que aportan o roban calor a una fuente térmica, que es el local a calefactar o refrigerar, respectivamente. Estos equipos suelen utilizar un ciclo frigorífico convencional de compresión de vapor [8], para lo cual es preciso el uso de un sistema de compresión, robando o cediendo calor al ambiente exterior (equipo exterior). La eficiencia de este tipo de sistemas se establece como la relación entre el calor que se cede (calefacción) o roba (refrigeración) del local a climatizar, y la energía eléctrica que se consume en el motor que mueve al compresor, a través de su eficiencia. A su vez, dicho indicador depende de la eficiencia de cada uno de los elementos que componen el sistema (evaporador, condensador, compresor). Los equipos que transfieren calor tienen una eficiencia limitada a las temperaturas puestas en juego, tanto en los ambientes exterior e interior, como de los fluidos térmicos involucrados. Así, se encuentra una limitación debida al equipo exterior impuesta por la temperatura del aire ambiente: la diferencia de temperaturas entre los focos de trabajo va acompañada de un salto de presiones en el compresor, incrementándose el trabajo del mismo y por tanto el consumo de energía eléctrica.

Con objeto de aumentar la eficiencia de este tipo de sistemas (disminuyendo los consumos energéticos y emisiones), uno de los aspectos que va cobrando mayor auge es el uso del terreno como fuente térmica a través de las bombas de calor geotérmicas (GSHP o *Ground Source Heat Pump*) [9]. Esto supone que el equipo exterior no trabaja intercambiando calor con el medio ambiente, sino con el terreno por medio de un fluido térmico (agua líquida con anticongelante). Para ello, se entierran una serie de tubos por los que circula dicho fluido a calentar o enfriar. El medio exterior se sustituye por terreno y presenta la ventaja de una elevada eficiencia energética como consecuencia de estar empleando una fuente térmica que mantiene estable su temperatura en el rango de interés.

Una de las características principales del terreno es que, a partir de una profundidad determinada, su temperatura es muy estable, oscilando estacionalmente mucho menos que la del aire ambiente. Así, se puede hablar de temperaturas que oscilan entre 16°C y 22°C, para los países del sur de Europa, como es el caso de España. Esto repercute muchísimo en la transferencia de calor, no por la cantidad, sino por su calidad. Al existir menos diferencia de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor, significa que el incremento de presión al que tiene que hacer frente el compresor de la máquina se reduce, y con ello el consumo eléctrico. A igualdad de calores transferidos, un menor consumo de electricidad supone un

incremento de eficiencia en la máquina, y con ello una reducción considerable de las emisiones asociadas a su generación.

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son, en primer lugar, un ahorro en la factura energética, mejorando en más del 30% la eficiencia del sistema en invierno, y más del 45% en verano (superando con creces un ahorro en consumo de energía final del 20%) [10], la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 66% respecto a los sistemas que utilizan combustibles fósiles y por último la reducción de los costes de mantenimiento de la instalación en aproximadamente la mitad respecto a otros sistemas convencionales [11]. Asimismo, las bombas de calor geotérmicas son más silenciosas que las aerotérmicas y el intercambiador de calor acoplado al terreno puede sustituir a las torres de refrigeración evitando los problemas asociados de legionelosis [12]. Finalmente, al utilizar como foco térmico el terreno, se evitan problemas de funcionamiento por temperaturas ambientales extremas (muy altas en verano y muy bajas en invierno). Esta tecnología está actualmente muy extendida en el Norte de Europa y América [10, 13-14], pero no así en las zonas mediterráneas, donde la demanda de refrigeración prima sobre la de calefacción.

Desde hace algún tiempo se viene investigando e impulsando esta tecnología en España, a través de diferentes proyectos, guías y proyectos asociados [15-17], lo que ha permitido incluir esta solución como herramienta de ahorro energético en la certificación energética de edificios. Con el objetivo de alcanzar un consumo final de energía de 40,5 ktep para esta tecnología, en 2020, en España, el PANER establece unas previsiones de actuaciones para su correcta implantación en el sector de la edificación, implicando para ello a las diferentes administraciones [18]. Todo ello se ha plasmado recientemente en la publicación de la Guía Técnica de Diseño de Bomba de Calor Geotérmica por parte del IDAE [19].

Esta Guía será la fuente inicial de la que se tomarán los requerimientos mínimos para el diseño del sistema. El objeto de este documento es fijar las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir las instalaciones de bomba de calor geotérmica de circuito cerrado para climatización de edificios y producción de agua caliente sanitaria, especificando los requisitos de diseño, instalación y mantenimiento. En la propia introducción del documento, se indica que esta guía no constituye un manual de diseño de aplicación indiscriminada, y aconseja recurrir, en caso necesario, a herramientas de análisis y simulación más avanzadas.

Con los antecedentes mencionados se justifica el interés por parte de las diferentes administraciones en cuanto al desarrollo de sistemas eficientes energéticamente. Entre ellos, se ha constatado la importancia del uso del terreno como fuente térmica para la climatización de edificios y viviendas. En este sentido, también se constata la necesidad de realizar, en áreas mediterráneas, estudios asociados al uso del terreno como fuente térmica en sistemas de climatización, de los que no se tiene suficiente información.

Estos estudios tienen como objetivo principal la definición del número suficiente de perforaciones en el subsuelo que permita a éste responder de forma adecuada a los requerimientos de las máquinas climatizadoras del edificio, para hacer frente a las diferentes demandas térmicas del mismo con un menor consumo de energía final (electricidad). Para tal fin será nece-

sario conocer, de forma precisa, las características del terreno (temperaturas, conductividad y difusividad térmica, etc.) y para ello se ha diseñado un equipo que permite realizar un test de respuesta térmica del terreno (TRT) [20]. Estos ensayos siguen las especificaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y la Asociación Internacional de Bomba de Calor Acoplada al Terreno (IGSHPA). Para ello se ha realizado una perforación piloto de diámetro 150 mm y profundidad 120 m, disponible en la Universidad de Jaén. En la perforación vertical se ha introducido un tubo en U (ida y vuelta), de polietileno PE 100 SDR11 PN16 y diámetros 40x36 mm, rellenándola con bentonita (Fig. 1). Los extremos del tubo se unen al dispositivo de ensayo, que es el equipo desarrollado y que se presenta en este artículo (Fig. 2).



Fig.1: Extremos de la tubería en U introducida en la sonda



Fig. 2: Máquina TRT montada sobre remolque y conectada a sonda

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. FUNDAMENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO A PARTIR DE ENSAYOS TRT

Para el diseño del campo de sondas será necesario conocer las cargas térmicas del edificio a climatizar y la capacidad de disipación de cada una de las sondas. Para obtener la capacidad de disipación de cada una de las sondas será necesario el análisis y modelado de la transferencia de calor con el terreno a partir de la ley de Fourier [21] y utilizando técnicas experimentales asociadas a su análisis teórico con modelos analíticos [22, 23].

Existen diferentes modelos analíticos y numéricos para evaluar la respuesta térmica del suelo. En Europa el método más empleado es el de la línea infinita [24], debido a su simplicidad y a la rapidez de su aplicación. Este método parte de la ecuación general de difusión de calor en coordenadas cartesianas, Ec. (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

y considerando flujo unidimensional, conductividad constante y que no existe generación de energía, la ecuación se reduce a la Ec.(2):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{donde: } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{\lambda}{C_p} \quad \text{Difusividad térmica} \quad (2)$$

Para resolver la ecuación se define la variable $\eta = \frac{x^2}{4\alpha t}$, que permitirá integrar la Ec. (2), llegando a la Ec.(3):

$$T_b = T_{sur} + C_1 \int_{\eta_0}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad (3)$$

Fijando las condiciones de contorno para r_b (radio de la sonda), obtendremos el valor de la constante C_1 , y llevando este valor a la Ec.(3), se obtendrá la ecuación buscada, Ec.(4):

$$T_b = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{4 \pi \lambda H} e^{-\eta_b} \int_{\eta_0}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad (4)$$

Esta ecuación puede simplificarse sabiendo que el término $e^{-\eta_b} \rightarrow 1$ cuando el tiempo es prolongado. Con esta simplificación, la Ec.(4) se reduce a:

$$T_b - T_{sur} = \frac{\dot{q}}{4 \pi \lambda} \int_{\frac{1}{4F_0}}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta \quad \text{donde: } \dot{q} = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{H} \quad \text{y} \quad F_0 = \frac{\alpha t}{r_b^2} \quad (5)$$

siendo: H = profundidad de la sonda (m); \dot{m} = Flujo (kg/s); c_p = calor específico del fluido (kJ/kg K); T_b = Temperatura extremo del relleno (K); T_{sur} = Temperatura no perturbada del terreno (K); \dot{q} = Flujo de calor (W/m); λ = conductividad térmica del terreno (W/m K); F_0 = número de Fourier; r_b = radio de la sonda (m); α = difusividad térmica del terreno (m²/s);

La integral exponencial de la Ec.(5) puede ser aproximada [25], obteniéndose:

$$\int_{\frac{1}{4F_0}}^{\infty} \frac{e^{-\eta}}{\eta} d\eta = -\gamma + \ln \left(\frac{1}{\eta^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\eta^2)^n}{n n !} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que el término $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\eta^2)^n}{n n !} \rightarrow 0$ para valores de tiempo $t \geq \frac{5 r_b^2}{\alpha}$, se llega a:

$$T_b = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (7)$$

Por otro lado, para el problema de transferencia de calor dentro de la sonda, la temperatura media del tubo (T_f) puede ser calculada usando la temperatura de la cara lateral de la sonda [26], considerando que entre el fluido caloportador y la pared del pozo existe una resistencia térmica R_b (K/(W/m)), resistencia que caracteriza la transferencia de calor entre el fluido térmico y la pared exterior del sondeo, en contacto con el terreno circundante, cumpliéndose:

$$T_f = T_b + \frac{\dot{q} R_b}{H} \quad (8)$$

Igualando las Ecs. (7) y (8) se obtiene:

$$T_f = T_{sur} + \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) R_b}{H} \quad (9)$$

dónde: $\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$ = diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del fluido (K); γ = constante de Euler = 0,577216; t = tiempo (s).

Teniendo en cuenta que es la potencia calorífica que aporta el fluido, llegamos a:

$$T_f = T_{sur} + \dot{Q} \frac{1}{4 \pi \lambda H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \dot{Q} \frac{R_b}{H} \quad (10)$$

Si \dot{Q} es constante, realizando los cambios oportunos, se puede expresar la Ec.(10) como:

$$T_f = m \ln(t) + n \quad (11)$$

Que presenta una relación lineal entre T_f y $\ln(t)$. Por tanto, realizando un ensayo en la sonda que consistirá en hacer circular un fluido que aporte una potencia calorífica constante al terreno, a partir de la serie de valores de las temperaturas de entrada y salida del fluido a lo largo del tiempo, se obtiene una serie de valores de T_f como la media aritmética entre cada temperatura de entrada y de salida. Mediante una regresión lineal obtendremos los valores m y n de la Ec.(11). Las series de datos deberán ser lo suficientemente largas para garantizar un buen ajuste, además, deberán descartarse las primeras horas del ensayo para garantizar la condición que dio lugar a la Ecuación 7.

Para obtener los valores buscados λ y α a partir de m y n aún se necesita conocer T_{sur} y R_b .

La resistencia del material de relleno R_b es conocida a partir de las características del mismo que aporta el fabricante, mientras que T_{sur} debe obtenerse experimentalmente mediante un ensayo en el que se hace circular, en régimen laminar, el fluido contenido en la sonda antes de cualquier aporte calórico al terreno. En este ensayo se registran los valores de temperatura del fluido a lo largo del tiempo necesario para que toda la columna de agua haya circulado, calculando T_{sur} como su valor medio.

En la Fig. 3 se muestra el equipo desarrollado para realizar estos ensayos, cuyo funcionamiento general es el siguiente:

- Inicialmente hay que realizar una prueba de presión, para garantizar la estanqueidad de la instalación enterrada. Posteriormente se realizan dos tipos de pruebas para la caracterización térmica del terreno: Estimación de la temperatura del terreno a diferentes profundidades (perfil de temperaturas) con el objeto de determinar la temperatura media del suelo inalterado (T_{SUR}). Para ello se rellena el circuito con agua y se deja reposar un tiempo prudencial. El agua adquiere una temperatura prácticamente igual a la del terreno circundante. Posteriormente, se hace recircular y se mide su temperatura. En este caso, el régimen de circulación del fluido debe ser laminar, para que el error producido sea mínimo.

- Determinación de las características de conductividad y difusividad térmicas del terreno y sondeo. Para ello, se hace recircular agua en el circuito enterrado (en este caso con régimen turbulento), manteniendo constante la potencia calorífica aportada y se mide la evolución de la temperatura de impulsión y retorno a lo largo del tiempo. De los resultados de estas mediciones se determinan aquellas características mediante los cálculos matemáticos anteriormente descritos.



Fig. 3: Vistas anterior y posterior del equipo desarrollado mostrando circuitos hidráulico y eléctrico

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

Para llevar a cabo los ensayos descritos y medir las variables de interés a lo largo de los mismos, se ha diseñado y construido un equipo que consiste en un sistema hidráulico que permite la circulación de fluido por la sonda geotérmica con diferentes caudales tanto en régimen laminar como turbulento. Además, el equipo debe ser capaz de inyectar al terreno distintas potencias caloríficas. Para cada uno de los ensayos, tanto el caudal como la potencia calorífica aportada deben permanecer lo más estables posible a lo largo de todo el tiempo que dure el experimento; esto obliga a incluir reguladores tanto para el caudal como para la potencia.

Las variables de interés son las presiones y temperaturas del fluido, tanto en la impulsión hacia la sonda como en el retorno de la misma, así como el caudal circulante. Estas deben ser medidas con una precisión razonable a intervalos regulares de tiempo, en torno a un segundo. En la Fig.4 se muestra la pantalla de control del sistema donde aparecen los valores instantáneos de las variables de interés y los controles necesarios para la puesta en marcha y programación de los ensayos.

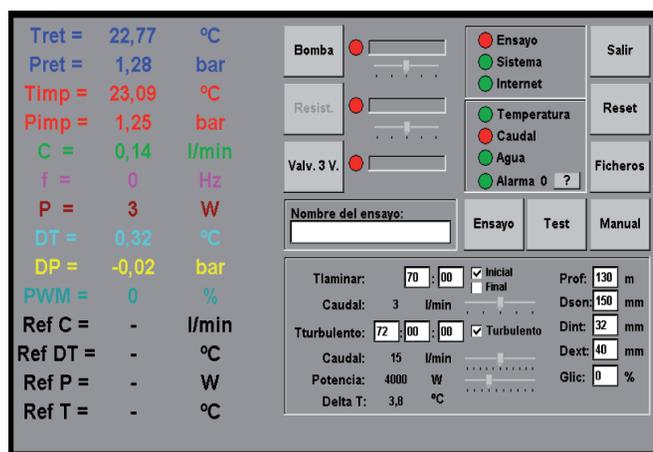


Fig. 4: Pantalla de control del sistema antes del inicio del ensayo



Fig. 5: Software para obtención del informe final del ensayo

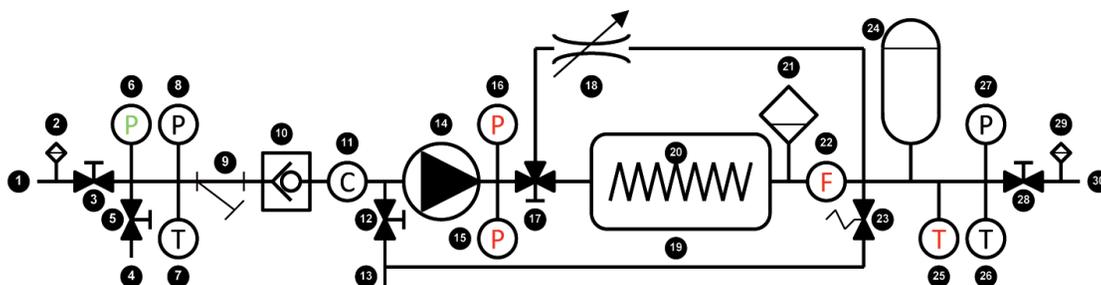
Tras realizar los ensayos se tienen las series de datos que deben ser procesadas adecuadamente para obtener los parámetros del suelo. Estos parámetros servirán de base en el diseño del campo de sondas necesario para cubrir la demanda térmica del edificio a climatizar. El equipo almacena todos estos datos en una memoria tipo SD para facilitar el trasvase de información a un PC donde, con el software desarrollado para esta aplicación (Fig.5), se obtiene el informe final del ensayo.

Además de lo indicado, el prototipo debe incluir las medidas de seguridad, tanto hidráulicas como eléctricas, para evitar accidentes y daños al equipo por mal funcionamiento. Es importante destacar que, debido a la larga duración de los diferentes ensayos (3 a 5 días), el sistema debe funcionar sin

supervisión; esto ha sido tenido en cuenta en el diseño incorporando las medidas de seguridad oportunas.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, el prototipo sigue el esquema de principio mostrado en la Fig.6.

- Como elementos actuadores consta de una bomba centrífuga, una resistencia eléctrica de potencia inmersa en un depósito y una válvula de 3 vías para hacer pasar el fluido por una válvula de estrangulamiento en los ensayos de bajo caudal, buscando el régimen laminar, pero evitando bajos regímenes de funcionamiento de la bomba.
- Como elementos hidráulicos adicionales se incorporan las válvulas de llenado y vaciado, un filtro para evitar la entrada de impurezas a la máquina, una válvula antirretorno que evita la circulación en sentido contrario y un vaso de expansión para absorber las dilataciones del fluido.
- Como elementos de seguridad se dispone de una válvula de sobrepresión hidráulica que descarga el fluido en caso de alcanzarse la presión máxima de trabajo, de presostatos para detectar situaciones de baja y alta presión que deberán impedir el funcionamiento de la bomba, un flujostato detector de caudal mínimo para evitar el aporte de potencia calorífica sin circulación de fluido, y un termostato de seguridad para impedir que el fluido alcance temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante de la sonda.



1	Retorno de sonda	2	Purgador	3	Válvula de retorno
4	Entrada de agua	5	Válvula de llenado	6	Manómetro
7	Sensor de temperatura de retorno	8	Sensor de presión de retorno	9	Filtro
10	Válvula antirretorno	11	Caudalímetro	12	Válvula de vaciado
13	Desagüe	14	Bomba	15	Presostato de baja
16	Presostato de alta	17	Válvula de 3 vías	18	Válvula de estrangulación
19	Depósito de calentamiento	20	Resistencia de calentamiento	21	Purgador
22	Flujostato	23	Válvula de sobrepresión	24	Vaso de expansión
25	Termostato	26	Sensor de temperatura de impulsión	27	Sensor de presión de impulsión
28	Válvula de impulsión	29	Purgador	30	Impulsión a sonda

Fig. 6: Esquema de principio del equipo desarrollado

El circuito eléctrico de control, que se encarga de accionar tanto la bomba como la resistencia, utiliza los contactos de los elementos de seguridad de forma que sea imposible tanto el funcionamiento de la bomba cuando las presiones no son adecuadas, como el aporte de potencia cuando no exista caudal por el depósito que contiene la resistencia, o cuando se alcancen temperaturas excesivas.

En la Tabla I se incluyen las características principales de los sensores de medida utilizados. Como sensores de temperatura de utilizan resistencias PT-100, como sensores de presión se utilizan células cerámicas piezo-resistivas y como sensor de caudal se utiliza uno del tipo ultrasónico.

Sensor	Tipo	Mínimo	Máximo	Exactitud
Temperatura	PT-100	0 °C	50 °C	±0,5 °C
Presión	Piezo-resistivo	0 bar	10 bar	±0,03 bar
Caudal	Ultrasónicos	0,5 l/min	25 l/min	±0,75 l/min

Tabla I: Características principales de los sensores de medida

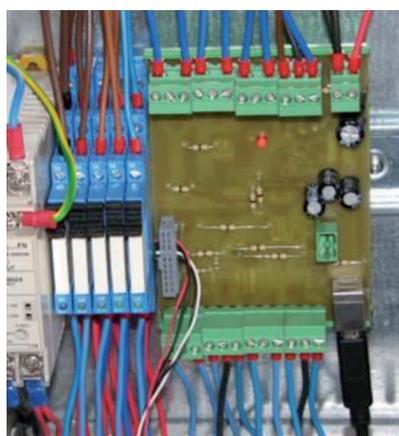


Fig. 7: Sistema electrónico de control y adquisición de datos

Para el accionamiento de la bomba con diferentes regímenes de caudal se utiliza un variador de frecuencia cuya consigna es establecida mediante un regulador PID implementado en el sistema electrónico de control y adquisición de datos. El accionamiento de la resistencia se realiza mediante un relé de estado sólido que permite variar la potencia entregada, variando el tiempo de encendido y apagado de la misma a intervalos de un semiperiodo de la red eléctrica mediante PWM, controlado mediante otro regulador PID también implementado en el sistema electrónico.

El sistema electrónico de control y adquisición de datos (Fig. 7) se ha diseñado específicamente para este prototipo encargándose tanto de la medida

de las variables necesarias para los experimentos como del control de los actuadores y la detección de situaciones anómalas. La manipulación del sistema se realiza desde una pantalla táctil (Fig. 4), desde la que es posible tanto la puesta en marcha del equipo (llenado, purgado y pruebas de estanqueidad y circulación) como la configuración de los parámetros de los experimentos y la realización de los mismos, capturando todas



Fig. 8: Máquina TRT montada sobre remolque para su transporte

las medidas a lo largo del tiempo del ensayo para su posterior procesamiento en un PC, consiguiendo así los parámetros de respuesta térmica del terreno buscados.

Todo el sistema se ha montado sobre una estructura a base de perfiles de aluminio que ha permitido dotarlo de una gran resistencia mecánica. Para evitar la transmisión de vibraciones e impactos, especialmente en el transporte, han sido utilizados elementos silent-blocks. Para poder transportar el equipo, toda la estructura se ha ubicado en un remolque estándar acoplable a un turismo sin superar la carga máxima transportable (Fig.8).



Fig. 9: Página web para la monitorización remota a través de Internet antes del inicio del ensayo

Puesto que los ensayos son de muy larga duración (de 3 a 5 días) y se realizan normalmente en obra, se ha dotado al prototipo de un equipo de comunicaciones basado en tecnología 3G que permite la monitorización y control remotos a través de Internet (Fig. 9). De esta forma es posible visualizar el estado del sistema, manipularlo a distancia si fuera necesario e incluso descargar los resultados de los ensayos antes de retirar la máquina por si fuera necesario realizar nuevos experimentos en caso de producirse cualquier fallo.

3. RESULTADOS

En las Figs. 10 y 11 se muestran los resultados gráficos obtenidos en el ensayo TRT realizado en la sonda piloto disponible en la Universidad de Jaén. La Fig.10 muestra el perfil de temperatura del terreno no perturbado a lo largo de toda la profundidad del mismo (120 m). A partir de estos datos se obtiene la temperatura T_{sur} . La Fig. 11a representa la evolución de las temperaturas de impulsión y retorno así como la temperatura media a lo largo del tiempo para un ensayo turbulento de 70 horas con potencia constante de 3000 W. Por último, en la Fig.11b aparecen estas mismas temperaturas pero representa-

das en función del logaritmo neperiano del tiempo. Se aprecia perfectamente la forma lineal de la gráfica si descartamos la primera parte del ensayo.

En la Fig.12 se muestra parte del informe que emite el software desarrollado, en el que se indican la geometría de la sonda y de la tubería, los resultados del análisis TRT (conductividad del terreno, conductividad del relleno, resistencia térmica de la sonda, capacidad calorífica del terreno, difusividad térmica del terreno, potencia, flujo y número de Reynolds) y las gráficas comentadas en las Figs. 10 y 11, entre otros datos de interés.

Además de los ensayos tradicionales, el equipo está preparado para llevar a cabo otros tipos de test. Entre ellos, uno muy característico es el de emular el funcionamiento real de sistemas de climatización para obtención de frío.

En la etapa de diseño del intercambiador geotérmico (GHE) se considera el funcionamiento a largo plazo con flujos caloríficos constantes. Sin embargo, las máquinas frigoríficas utilizadas en GSHP operan con ciclos a intervalos regulares, lo que hace que los transitorios a corto plazo sean bastante importantes en la transferencia térmica. Realmente, los picos de carga hacen que la temperatura del terreno aumente de forma significativa justo en el borde del relleno, lo que puede hacer que el sistema 'sature' y no pueda seguir funcionando (normalmente por precaución para evitar el deterioro del material del tubo de la sonda). Así, en dicho diseño se analiza el sistema considerando picos de carga, reajustando el diseño para evitar llegar a dicha situación. Sin embargo, el modelado a tan corto plazo no llega a ser tan fiable como el que se realiza a largo plazo.

El dispositivo desarrollado permite realizar una emulación del funcionamiento en condiciones reales. Así se puede conocer experimentalmente la desviación diaria estimada en el fluido térmico respecto a un valor medio, consiguiendo determinar los picos de temperatura que deben sumarse a los valores medios en la etapa de diseño, para garantizar la seguridad del sistema. La Fig.13 muestra los datos que se obtendrían en una instalación real funcionando 12 horas diarias durante 5 días.

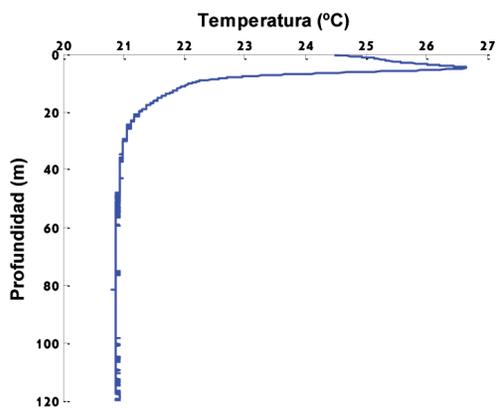


Fig. 10: Perfil de temperatura del terreno no perturbado a lo largo de toda la profundidad del mismo (120 m)

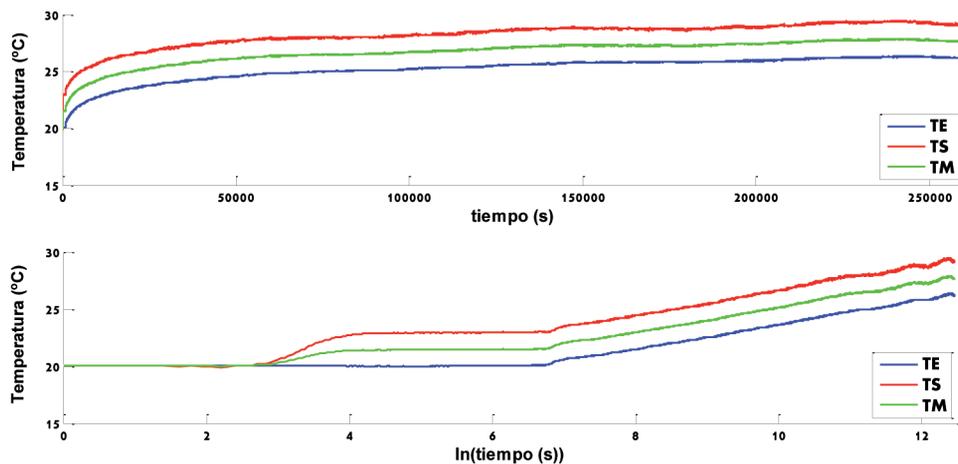


Fig. 11: a) Evolución a lo largo del tiempo de las temperaturas de impulsión (TS), retorno (TE) y media (TM) en el ensayo turbulento de 70 horas con potencia constante de 3000 W.

b) Idem al caso a) pero representadas en función del logaritmo neperiano del tiempo.

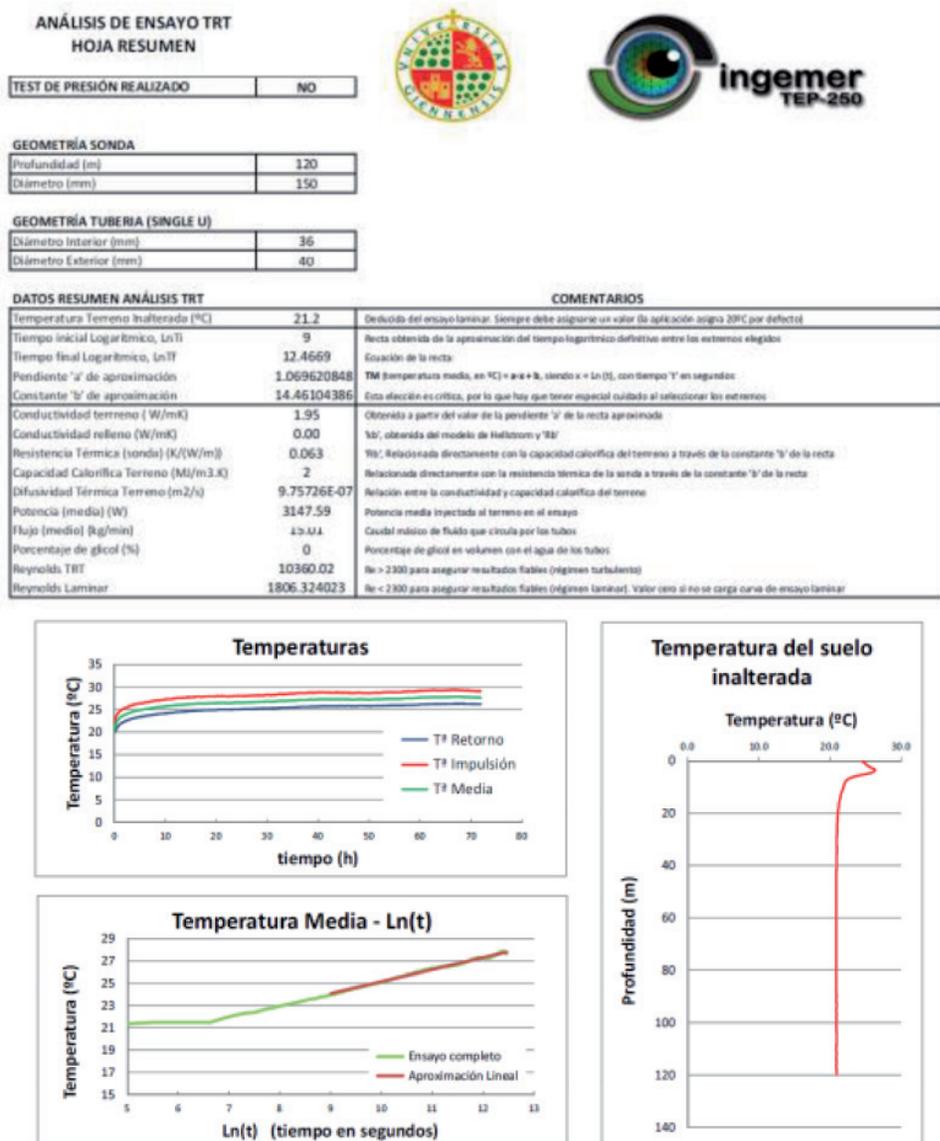


Fig. 12: Informe generado tras la realización del ensayo TRT

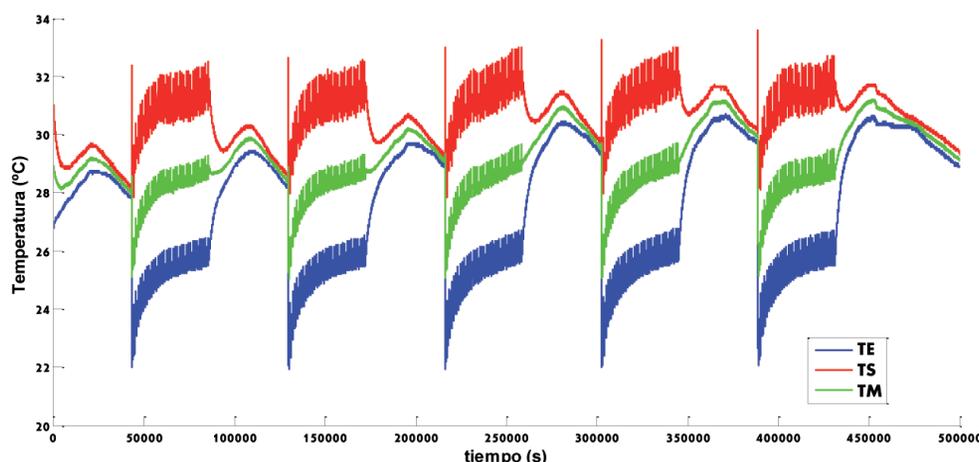


Fig. 13: Evolución a lo largo del tiempo de las temperaturas de impulsión (TS), retorno (TE) y media (TM) emulando una instalación real funcionando 12 horas diarias durante 5 días

4. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado ha concluido satisfactoriamente la fase de pruebas, tanto hidráulicas y eléctricas como de software y hardware. Se trata de un equipo robusto, fiable y de fácil manejo por parte del operario. Realiza de forma automática los test de respuesta térmica estandarizados y puede realizar otros, como se ha comentado anteriormente.

El equipo ha sido sometido a múltiples pruebas: ensayos de hasta 72 horas ininterrumpidas y emulación de ciclos intermitentes durante periodos de 7 días. Ha sido utilizado durante más de 6 meses (periodo invierno-verano) en distintas condiciones de funcionamiento en aras a conseguir simular el desgaste de los componentes más críticos de la máquina. Durante las pruebas se monitorizaron diferentes parámetros (presiones, caudales, temperaturas, etc.) de funcionamiento de la máquina lo que permitió evaluar su comportamiento y sintonizar correctamente los reguladores PID de caudal y potencia. La gran cantidad de ensayos realizados ha permitido detectar fallos y mejorar las prestaciones del equipo.

En la actualidad la máquina está siendo empleada por la empresa solicitante para realizar estudios TRT en distintas instalaciones proyectadas, tanto en viviendas unifamiliares como en edificios del sector terciario, con el fin de conseguir dimensionar el campo de sondas más adecuado. Los resultados obtenidos han sido plena-

mente satisfactorios, habiendo sido cotejadas las prestaciones de las instalaciones de climatización una vez puestas en funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Parte del trabajo presentado es el resultado de un contrato de investigación suscrito entre miembros del grupo de investigación TEP-250 de la Universidad de Jaén y la empresa Pilotes y Recalces del Sur S.L., para el desarrollo de un Sistema de ensayo de características del terreno como fuente térmica (Expediente 2439). Asimismo, este trabajo ha sido posible gracias al proyecto del Plan Propio de apoyo a la investigación de la Universidad de Jaén titulado ‘Análisis del aprovechamiento de fuentes renovables para la producción de frío: Aplicación a la provincia de Jaén (UJA 2007).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission. Europe 2020 – a strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM (2010) 2020 final. 2010, p. 35.
- [2] Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A., Gil, C. 2013. Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, pp. 134-143
- [3] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética en los edificios. Diario Oficial de la Unión Europea, 18 de junio de 2010
- [4] Anónimo (2010), Guía práctica de la energía: consumo eficiente y responsable (3ª ed.). IDAE, Madrid.
- [5] RD 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción, BOE nº 27, 31 de enero de 2007, p. 4499-4507.
- [6] Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. BOE nº 89 de 13 de abril de 2013, p. 27548-27562
- [7] Gómez Moreno A, Casanova Peláez PJ, Díaz Garrido FA, Palomar Carnicero JM, López García R, Cruz Peragón F. *Results of an experimental study of a solar cooling system in jaén using single effect lithium bromide absorption chiller*, *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQ)*, 2010, pp. 522.01-522.05
- [8] Wark, K.; Richards, D.E. (2000), *Termodinámica*, 6ª edición, McGraw-Hill, 2000
- [9] Anónimo (1997), *Geothermal Heat Pumps. Introductory Guide*. National Rural Electric Cooperative Association, Electric Power Research Institute, Oklahoma State University, International Ground Source Heat Pump Association.
- [10] Lund J.W. (2004), *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps – A World Overview*, edited and updated version of the article from *Renewable Energy World* (July-Aug, 2003, Vol. 6, No. 4), *Geo-Heat Center (GHC) Quarterly Bulletin*, Vol. 25, No. 3, ISSN 0276-1084, September 2004, 10 pp
- [11] Omer A.M. (2008), Ground-source heat pumps systems and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12, 344-371.
- [12] Magraner Benedicto, T. (2010), Validación Experimental de los Métodos de Diseño de Instalaciones de Bomba de Calor Acoplada al Terreno. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Física Aplicada
- [13] Lund J.W., Freeston D.H. (2000), World-wide direct uses of geothermal energy 2000, en: *Actas del Congreso World Geothermal Congress 2000 (Kyushu-Tohoku, Japón)*. 2000, p.1-21.
- [14] Sanner B., Karytsas C., Mendrinos D., Rybach L. (2003), Current status of ground source heat pumps and underground thermal storage in Europe, *Geothermics*, 32, 579-588.
- [15] Anónimo (2008), *Manual de geotermia*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: IDAE
- [16] Anónimo (2006), *Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along European Coastal Areas. Final Report*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006. EU 5th Framework Programme, NNE5-2001-00847.
- [17] Programa de Impulso a las empresas de servicios energéticos térmicos con energías renovables, GEOTCASA, BOE 122, 19 de mayo de 2010.
- [18] Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020, IDAE y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010.
- [19] Anónimo (2010), Guía Técnica de Diseño de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica, Guía Técnica, IDAE, Serie Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización.
- [20] Witte HJL, van Gelder GJ, Spittler JD. (2002). In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective. *ASHRAE Transactions*. 108(1):263-272
- [21] Incropera Et Dewitt (1996): *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley. New York, USA.
- [22] Piechowski, M., (1999), Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Theoretical development, *Int. J. Energy Res.*, 23, 571-588
- [23] Yang H, Cui P, Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems, *applied Energy* 87 (2010), 16-27
- [24] Ingersoll L.R., Et Plass, H.J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *Heating, Piping & Air Conditioning* 20/7, 119-122
- [25] Abramovitz M and Stegun I. Eds. (1964). *Handbook of Mathematical Functions*. National Bureau of Standards, Washington D.C.
- [26] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes, Ph.D. Thesis, Universidad de Lund (Suecia), 1987.