

Análisis de los parámetros térmicos del suelo necesarios para el diseño de una instalación de bomba de calor geotérmica

Teresa Magraner Benedicto, Salvador Quilis Marzal; Energesis Ingeniería S.L.

El correcto diseño de un sistema de climatización mediante energía geotérmica somera requiere garantizar que el suelo no se vea afectado térmicamente por el calor que se deposita o extrae de él a lo largo del tiempo. Para ello es imprescindible tener en cuenta las características del terreno en cuanto a su capacidad de conducir y almacenar el calor, es decir, su conductividad y difusividad térmica.

Si el terreno de alrededor de las tuberías que facilitan el intercambio térmico es uniforme, por ejemplo si el sistema está enterrado a poca profundidad, la medida de sus características térmicas puede hacerse a partir de una muestra pequeña del mismo.

Sin embargo, lo habitual es que no sea así. Si consideramos por ejemplo un sistema a base de sondeos verticales de entre 50m y 100m, nos encontramos generalmente con diversas capas de terreno de características heterogéneas, en cuanto su composición, grado de humedad o características geohidrológicas. En tales condiciones, la caracterización térmica pasa necesariamente por la realización de un test de respuesta térmica del terreno o TRT, que pretende la obtención de valores promediados o efectivos de la conductividad del terreno y resistencia térmica del sondeo que puedan servir para un correcto dimensionado del sistema de intercambio.

La técnica del TRT, desarrollada en Suecia a finales de los años 80, consiste en la realización de un primer sondeo para intercambio de calor que sirva de sondeo típico o de prueba (es decir con características típicas en cuanto a profundidad, relleno, configuración del tubo, etc.). Por dicho intercambiador se hace pasar, durante un cierto intervalo de tiempo, un flujo controlado de agua caliente (o fría) de manera que durante dicho tiempo se produce una cesión (o absorción) de calor constante en el tiempo, al tiempo que se registra el cambio de temperatura del agua en interior de la tubería. La evolución de dicha temperatura viene descrita en buena aproximación por el llamado "modelo de la línea infinita". Comparando el registro experimental de los datos de temperatura con dicho modelo teórico, pueden hallarse los valores de conductividad y resistencia térmica del sondeo que caracterizan el intercambio térmico. A partir de dichos valores, el proyectista tiene ya un modo fiable

de establecer un dimensionado óptimo de la instalación geotérmica.



Figura 1. Test de Respuesta Térmica

La técnica TRT justifica su coste – y de hecho se exige en muchos países - en instalaciones con un número de sondeos medio o alto, donde el riesgo de subdimensionado o sobredimensionado debe limitarse al máximo por razones técnicas, económicas y medioambientales. En instalaciones de pocos sondeos deben utilizarse valores conservadores de la conductividad y resistencia térmica a riesgo de sobredimensionar un tanto la misma.

En España se viene utilizando la técnica TRT en el dimensionado de instalaciones de geotermia somera desde hace algunos años. Si bien aún no tenemos una norma técnica al respecto, sería recomendable que quienes se plantean utilizar la geotermia como fuente energética sean conscientes de las ventajas y fiabilidad que supone el uso de esta herramienta, cuando se llevan a cabo las pruebas con el necesario rigor y profesionalidad.

Fundamentos teóricos del test de respuesta térmica del terreno

La caracterización de la respuesta térmica del suelo mediante la realización de medidas “in situ” se introdujo en Suecia y Estados Unidos en 1995, y se ha desarrollado desde entonces en otros países.

Existen diferentes modelos analíticos y numéricos para evaluar la respuesta térmica del suelo. En EE.UU y Canadá es frecuente emplear modelos cilíndricos conjuntamente con técnicas de estimación de parámetros mientras que en Europa el método más empleado es el de la

línea infinita debido a su simplicidad y a la rapidez de su aplicación.

El modelo de línea infinita se basa en la aproximación de que el intercambiador vertical es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante T_g . El modelo inicial fue desarrollado por Lord Kelvin; Ingersoll and Plass (1948) aplicaron el modelo a los intercambiadores de calor enterrados, mientras que investigaciones posteriores han validado el uso de este modelo para la estimación de las propiedades térmicas del suelo (Mogensen 1983, Kavanaugh, 1984; Austin, 1998; Gehlin, 1998).

El modelo aproxima el proceso de extracción o inyección de calor mediante la fórmula:

$$T_f = \frac{-(q_v \rho c (T_{out} - T_{in}))}{4\pi\lambda H} \left[\ln \left[\frac{4at}{r_0^2} \right] - \gamma \right] + \frac{q_v \rho c (T_{out} - T_{in}) R_b}{H} + T_g \quad (1)$$

donde:

- Tf : temperatura media del bucle enterrado
- qv : caudal circulante
- ρ : densidad fluido circulante
- c : calor específico fluido circulante
- Tout : temperatura de retorno del bucle enterrado
- Tin : temperatura ida al bucle enterrado
- Tg : temperatura estable del suelo
- λ : conductividad térmica del suelo
- H : longitud tubería enterrada
- Rb : resistencia térmica del bucle enterrado
- γ : constante de Euler
- t : tiempo
- ro : diámetro perforación
- k : coeficiente de regresión Tf con ln (t)
- a : difusividad térmica

Esta expresión puede emplearse bajo la siguiente condición:

$$t \geq \frac{5r_0^2}{a}$$

Por lo que las propiedades térmicas se pueden estimar con los datos medidos en el ensayo como:

$$\lambda = \frac{-(q_v \rho c (T_{out} - T_{in}))}{4\pi H k} \quad (2)$$

y una vez obtenida la conductividad térmica (λ) se puede calcular la resistencia térmica del bucle enterrado (Rb) mediante la expresión (1)

Características del ensayo

Para la determinación de las características térmicas del suelo, se fuerzan pulsos de inyección de calor o pulsos de extracción de calor en un bucle enterrado y se mide su respuesta en temperatura (**figura 2**). Los TRT de primera generación constan, generalmente, de una resistencia eléctrica para la generación de los pulsos de calor; mediante estos dispositivos, únicamente se pueden realizar ensayos de inyección de calor, que equivalen al funcionamiento de la instalación de climatización geotérmica en refrigeración. Los TRT de segunda generación incorporan una bomba de calor como sistema de generación térmica, así se pueden forzar pulsos tanto de inyección como de extracción de calor, realizando ensayos en ambos modos de funcionamiento (calefacción y refrigeración).

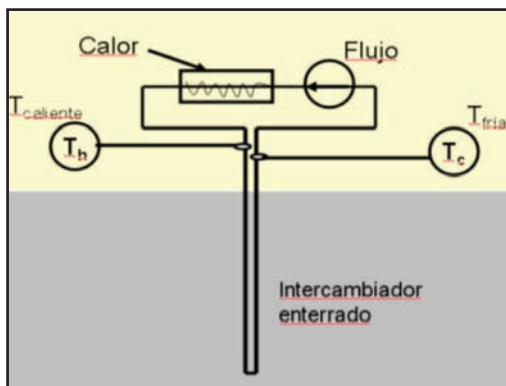


Figura 2.
Esquema de realización de un TRT

El ensayo, por tanto, consiste en asegurar una potencia de inyección o extracción constante controlando el caudal de agua circulante por el intercambiador enterrado y la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, registrando estos valores durante un intervalo de tiempo.

Las especificaciones de los parámetros establecidos para la ejecución de los TRT indicados por la Agencia Internacional de la Energía y la Asociación Internacional de Bomba de Calor Acopladas al Terreno son:

- Duración del test > 36 hrs (IGSHPA) y >50 hrs (IEA).
- Dejar 5 días de margen entre el test y la ejecución de la perforación
- Calor inyectado 30-80 W/m
- Calor extraído 20- 50 W/m
- Flujo turbulento
- Margen de 10-14 días entre ensayos

Errores detectados durante la ejecución del TRT

Aun manteniendo los parámetros establecidos por los diferentes estándares internacionales durante la ejecución del TRT, en muchas ocasiones nos encontramos con fallos que producen errores y en algunos casos llegan a invalidar los resultados obtenidos. Los más comunes son:

1. Corte de suministro eléctrico

Esto error suele derivarse de los problemas asociados a los cortes en el suministro eléctrico de los cuadros eléctricos de obra, quedando invalidado el ensayo del TRT. Para evitar este problema una alternativa es trabajar con grupos electrógenos con autonomía suficiente para poder realizar el ensayo.

2. Mal aislamiento de las tuberías de conexión entre el TRT y la sonda geotérmica

Cuando se conecta el TRT al sondeo geotérmico siempre existen unas tuberías de conexión entre ambos elementos. Estas tuberías generan una pérdida de calor que se pueden cuantificar (si tenemos en cuenta únicamente el proceso de conducción de calor) de una forma simplificada según la fórmula $Q_{pérdidas} = K * (T_{ambiente} - T_{fluido}) * l$, donde el coeficiente K depende de las características térmicas del propio material de la tubería de conexión y de los materiales de aislamiento que envuelven a dicha tubería, el coeficiente l representa la longitud de la tubería, $T_{ambiente}$ representa la temperatura ambiente y T_{fluido} la temperatura media del fluido. Las pérdidas generadas en las tuberías de conexión producen un error en los datos obtenidos debido a la variación de la potencia constante de inyección o extracción durante el ensayo.

En la **figura 3** se muestra una evolución de temperaturas en el sondeo geotérmico fuertemente afectada por la temperatura ambiente y en la **figura 4** se puede apreciar la

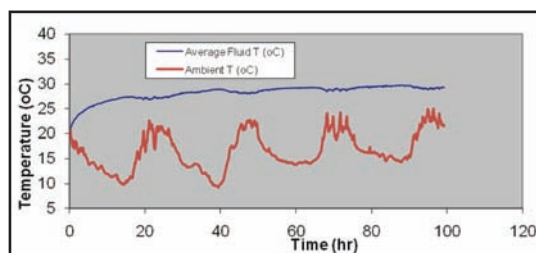


Figura 3

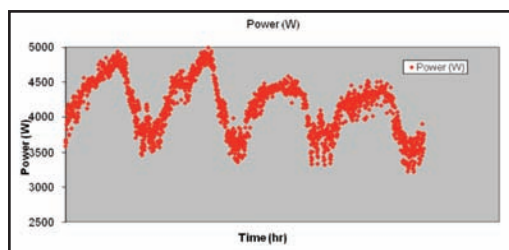


Figura 4. Gráfica de evolución de potencias afectadas por temperatura ambiente

influencia de estas variaciones sobre la potencia inyectada.

Para minimizar los errores producidos debido a las pérdidas a través de las tuberías de conexión se aconseja:

- Instalar un buen aislamiento en las tuberías de conexión
- Minimizar la longitud de las tuberías de conexión.

3. Mala ubicación de los sensores de temperatura

Como consecuencia de lo descrito en el punto 2, hay que diferenciar entre la potencia que se inyecta o extrae del sondeo geotérmico y la que generamos con el TRT. Generalmente las sondas de temperatura se encuentran ubicadas en el propio dispositivo del TRT por lo tanto la potencia medida es la de generación del TRT no la del sondeo, produciéndose un error en los datos obtenidos debido a las variaciones de potencia. Para evitar este error el TRT debería incorporar sondas de temperaturas móviles que se pudieran instalar a la entrada y salida de la sonda geotérmica (**figura 5**).

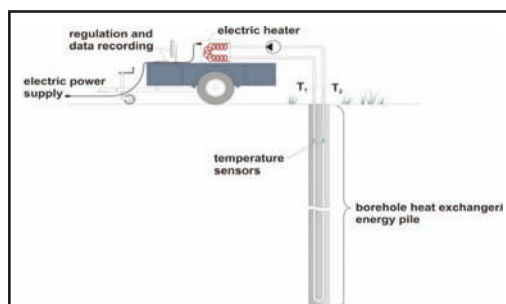


Figura 5. Esquema TRT con sensores de temperatura en perforación

4. Mal dimensionamiento del depósito de acumulación en los TRT de bomba de calor

Un error bastante común es el de un mal dimensionamiento del depósito de acumulación en los TRT de bomba de calor. Las bombas de

calor aire-agua generan una potencia calorífica o frigorífica que depende del foco de temperatura del aire, dichas bombas de calor acumulan la energía en un depósito de acumulación que después mediante un control inyectará o extraerá potencia constante al sondeo geotérmico. Por lo tanto hay que prever un depósito de un volumen determinado para que en aquellos casos donde la bomba de calor genere poca potencia debido a un foco de temperatura ambiente extremo el depósito mediante el control siga siendo capaz de generar potencia constante.

En los casos donde las temperaturas ambiente son extremas hay que proceder mediante una buena estrategia de control de calentamiento o enfriamiento previa al ensayo que den suficiente inercia al depósito de acumulación.

5. Mal control en los TRT de bomba de calor

El control de los TRT de bomba de calor es clave para que la potencia de calor inyectada y extraída se mantenga constante, para ello hay que realizar un buen control mediante un PID que permita mantener el salto térmico de las temperaturas de entrada y salida del sondeo constante durante todo el ensayo.

6. Error en la medición de la temperatura del sondeo en función de la profundidad

Antes de ejecutar los ensayos de inyección o extracción se puede realizar un análisis de las temperaturas del sondeo a diferentes profundidades, para ello hay que hacer trasegar un caudal que genere un flujo laminar por el sondeo geotérmico para que el error producido al hacer trasegar el fluido por la tubería sea lo más pequeño posible. El régimen laminar produce un coeficiente convectivo entre el fluido y la pared interior de la sonda geotérmica inferior al de régimen turbulento. Por lo tanto es aconsejable que los TRT dispongan de bombas de circulación con variador de frecuencia para poder generar diferentes rangos de caudales.