

ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE ENERGIA TERMICA: RESULTADOS DE UN ENSAYO DE RESPUESTA TERMICA DEL SUBSUELO

Arturo J BUSO*, Manfred REUß#, Jens MÜLLER# y Noemi SOGARI*

* Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – UNNE – Corrientes – Argentina.

Institute of Agricultural Engineering, Technical University Munich – Freising – Alemania.

e-mail: ajbusso@exa.unne.edu.ar

RESUMEN

Se expone un Ensayo de Respuesta Térmica realizado a un intercambiador de calor de pozo de 99m de profundidad en Erfurt, Alemania. La resistencia térmica entre el fluido caloportador y la pared del pozo y la conductancia térmica del material del subsuelo, se determinaron comparando los datos experimentales con un modelo matemático que describe el proceso de transferencia de calor, obteniéndose: $R_b = 0.175 \text{ }^\circ\text{K}/(\text{w/m})$ y $\lambda = 2.78 \text{ W/m }^\circ\text{K}$ respectivamente. Por otro lado, la simulación del pozo mediante el programa EED (Earth Energy Designer) arroja un valor ideal $R_b = 0.14 \text{ }^\circ\text{K}/(\text{w/m})$. Se plantean además, las posibles causas que explican las características observadas en la curva de evolución de temperatura, así como, en la diferencia entre el valor de R_b de simulación y el experimental.

PALABRAS CLAVE

almacenamiento, energía térmica, conductividad térmica, resistencia térmica, BHE, respuesta térmica, UTES.

INTRODUCCION

La crisis del petróleo de 1973-1974 promovió el interés por nuevas fuentes de energía además de novedosas y más eficientes formas de utilización de las mismas. En este nuevo contexto el almacenamiento de energía directamente en forma de calor sensible o latente, más específicamente, el almacenamiento subterráneo de energía térmica (UTES – Under Ground Thermal Energy Storage) (IEA, 1995; ASHRAE, 1998), ha tenido en los últimos años un empuje particular. Una de las ventajas del almacenamiento de calor, es que puede ser aplicado en momentos en que la producción y la demanda del mismo se encuentran fuera de fase, con una escala de tiempo que puede variar desde la diaria a la estacional y de ello dependerá el tipo de almacenaje que se aplique (de corto plazo o de largo plazo).

Para el caso de almacenamiento de largo plazo, una de las técnicas utilizadas es el almacenamiento en subsuelo no saturado o rocoso (UTES: state of the art, 1994) empleando intercambiadores de calor en pozos o perforaciones verticales (BHE – Borehole Heat Exchanger). Mediante estos intercambiadores, energía térmica es inyectada o extraída del subsuelo y entregada a los consumidores ya sea en forma directa o a través de bombas de calor (Sanner, *et al*, 1998).

Es por tanto de suma importancia desarrollar métodos que permitan la optimización de estos sistemas antes de encarar su construcción. Una de las maneras de lograr este objetivo es mediante cálculo y simulación. Así, la conductividad térmica, λ , del subsuelo y la resistencia térmica, R_b , entre el fluido caloportador y la pared del pozo, son dos parámetros que afectan la eficiencia del depósito de calor y es por ende deseable su determinación

El presente trabajo presenta los resultados de un ensayo de respuesta térmica, llevado a cabo con el objetivo de determinar las propiedades térmicas del subsuelo en Erfurt, Alemania, durante el mes de febrero de 2000. El ensayo se realizó como paso necesario para encarar estudios de simulación y posterior toma de decisión respecto a la viabilidad técnica de un futuro proyecto de almacenamiento estacional de energía térmica acoplado al sistema de calefacción central del distrito.

FUNDAMENTOS TEORICOS

Un sistema de almacenamiento subterráneo de calor consiste, en general, en un número de intercambiadores de pozo (BHE) interconectados, cuya profundidad, H , es superior a los 25m, que interactúan entre si y en los cuales la potencia, Q , de inyección/extracción de energía térmica es variable. La figura 1 presenta el esquema de un sistema típico.

Dado que el ensayo de respuesta térmica se realiza con un solo pozo, el análisis de los datos recopilados durante el mismo se basa en un modelo teórico que primero, no contempla estas interacciones y segundo, asume potencia de inyección/extracción constante (Helltröm, 1991).

Es sabido que la temperatura del subsuelo aumenta con la profundidad debido al gradiente geotérmico. Además, este gradiente geotérmico no varía con el tiempo y, a profundidades superiores a los 10-15 m, los cambios estacionales en la temperatura de superficie no tienen influencia sobre la temperatura del subsuelo (Helltröm, 1991; Eskilson, 1987).

En condiciones naturales se dice entonces que, el campo de temperatura alrededor del pozo se encuentra a la temperatura de equilibrio no perturbada del subsuelo T_{sup} . La inyección/extracción de calor del pozo, a velocidad constante, produce una

perturbación en esta temperatura de equilibrio, perturbación que se propaga en el tiempo y espacio, tomando de 20 a 25 años para llegar a una nueva situación de equilibrio (Nordell, 1994).

Así, los procesos térmicos que toman lugar en el terreno cuando se produce el intercambio de calor con el mismo pueden dividirse en dos:

- 1.- Proceso transitorio; cuando la temperatura del subsuelo aumenta.
- 2.- Proceso estacionario; cuando se logra el nuevo estado de equilibrio y la temperatura del subsuelo permanece constante.

De ahí en más la pérdida/ganancia de calor a través de contorno del depósito de calor igualan a la inyección/extracción de calor en el pozo.

Dado que un ensayo de respuesta térmica toma varios días, solo el proceso transitorio es de interés para la deducción del modelo matemático que describe el fenómeno (Eklöf, 1996).

Para comenzar el análisis partimos de la ecuación fundamental de conducción del calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Suponiendo al intercambiador como una fuente lineal de calor (Hellström, 1991; Eskilson, 1987; Eklöf, (1996) por la cuál se inyecta energía a una potencia $q = Q/H$ independiente del tiempo, la solución general de [1] viene dada por

$$T_Q(r, t) = T_{sur} + \frac{Q}{4\pi\lambda H} E_i\left(\frac{at}{r^2}\right) \quad \text{con} \quad E_i(\tau) = \int_{\frac{1}{4\tau}}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds \quad ; \quad \frac{1}{\tau} = \frac{r^2}{at} \quad ; \quad a = \frac{\lambda}{c_r}$$

$E_i(\tau)$ puede ser desarrollada en serie y según sea el valor de τ ciertos términos de la misma pueden ser despreciados. Este hecho determina que cuanto mayor sea la duración del ensayo mayor será la validez de la solución matemática. Se establecen entonces dos criterios de tiempo; el primero (para $\tau \geq 0.5$) representa el tiempo a partir del cual la solución es válida con un error de 2% y el segundo (para $\tau \geq 5$) representa el tiempo a partir del cual la solución es válida con un error de 1%.

Considerando que entre el fluido caloportador y la pared del pozo existe una resistencia térmica, R_b [K/(W/m)], de forma que se cumple que:

$$T_f - T_r(t) = R_b \frac{Q}{H}$$

Tomando $\tau \geq 5$ y $r = r_0$ (pared del pozo), la temperatura del fluido está dada por:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4at}{r_0^2}\right) - \gamma \right] + \frac{R_b Q}{H} + T_{sup} \quad (2)$$

que puede ser expresada como:

$$T_f = m \cdot \ln(t) + n \quad \text{con} \quad m = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad \text{y} \quad n = \frac{Q}{H} \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4at}{r_0^2}\right) - \gamma \right) - R_b \right] + T_{sup} \quad (3)$$

DESARROLLO DEL ENSAYO

El ensayo se llevo a cabo durante los días 7 al 16 de febrero del 2000 en la localidad de Erfurt, Alemania. Por tratarse de una prueba *in situ*, el intercambiador de calor en pozo objeto de estudio estaba ubicado en el medio de una playa de estacionamiento pavimentada.

La perforación tenía una profundidad $H = 99.7\text{m}$ y un diámetro $D = 152\text{ mm}$. El intercambiador estaba formado por un doble circuito en U compuesto por tubo de polietileno $32 \times 3\text{ mm}$. Para mejorar la transmisión de calor entre el intercambiador y el terreno, se rellenó la perforación con una mezcla de bentonita, cemento y agua desde el fondo y hasta una profundidad de 4m del nivel del suelo, sección esta que se relleno con arena.



Fig1.- Esquema de un sistema de intercambiadores de pozo.

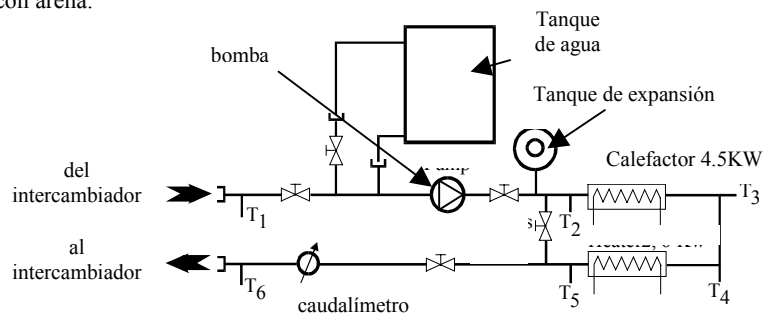


Fig2.- Detalle del circuito hidráulico utilizado para la realización del ensayo.

El equipo de ensayo utilizado era transportable y compuesto por un sistema de adquisición de datos, conductos de conexión, fuente de poder para los calefactores y el circuito hidráulico que incluía los sensores de temperatura y caudal. La figura 2 muestra un detalle del circuito hidráulico.

Los sensores de temperatura de tipo PT100, con vaina de acero y sensibilidad $\pm 0.01K$ fueron calibrados en un baño térmico de temperatura regulada, determinándose de esta manera, las constantes de calibración utilizadas en el programa de adquisición de datos. El caudal utilizado durante el ensayo fue de $0.786 \text{ m}^3/\text{h}$ y la potencia inyectada medida, de 4.36 kW .

La temperatura T_{sup} se determinó haciendo circular el fluido durante 17 hs sin inyección de calor, estabilizándose en 8.5°C . El sistema de adquisición de datos se programó para realizar lecturas de temperatura cada 30 seg. y registrar en disco cada minuto el valor promedio.

RESULTADOS

La figura 3 muestra en base logarítmica de tiempo la evolución de la temperatura ambiente, temperatura media del fluido y potencia inyectada. En ella se indican tres intervalos de confianza, A, B, C y el tiempo t_b , a partir del cual, el error de la solución matemática está dentro del 2% y 1% respectivamente.

Se observa que, a pesar de que el intervalo A responde al primer criterio de tiempo, la dinámica del proceso aun no se encuentra completamente desarrollada, presentando la curva al final del mismo, un cambio de pendiente que podría introducir un error considerable en la determinación de los parámetros buscados.

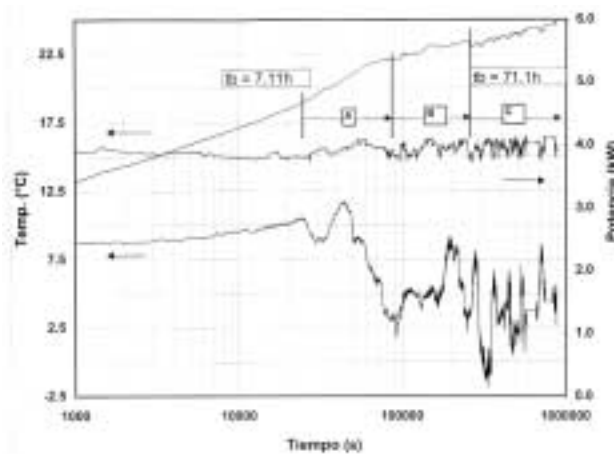


Fig.3.- Evolución de la temperatura media del fluido (línea superior), potencia inyectada (línea media) y temperatura ambiente (línea inferior).

Se aprecia también, una disminución repentina en la evolución de la temperatura entre los intervalos B y C presumiblemente asociada con las condiciones climáticas reinantes ese día (intensa lluvia y baja temperatura ambiente). La intensa lluvia podría haber producido la saturación de la arena en los cuatro primeros metros del pozo haciendo que el tubo intercambiador entrara en contacto con un medio más frío que el subsuelo provocando la disminución de la temperatura media del fluido en su interior. No obstante ello, se observa que la pendiente en los dos intervalos es aproximadamente la misma indicando que la dinámica del proceso de inyección de calor al medio no se alteró.

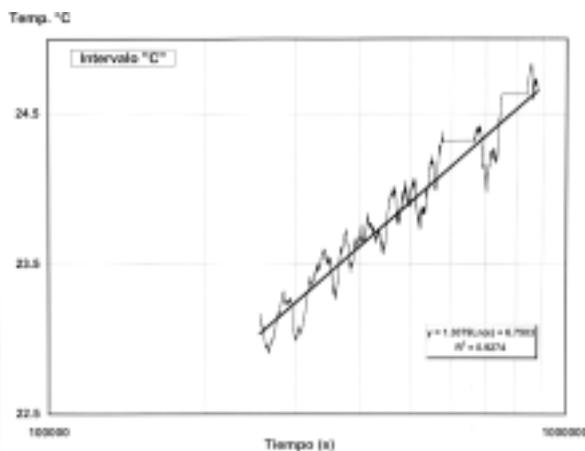


Fig.4.- Temperatura media del fluido y recta de ajuste en base logarítmica de tiempo para el intervalo C.

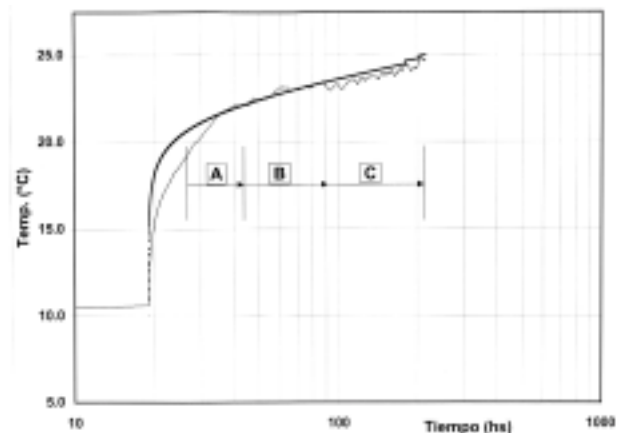


Fig.5.- Comparación entre temperatura media de fluido experimental y teórica (ec.2).

Por todo lo anteriormente dicho, solo los intervalos B y C fueron considerados y analizados en forma separada. A las gráficas obtenidas aplicando la ec.(3) se aplicó el método de cuadrados mínimos para obtener la pendiente de la recta de ajuste. La figura 4 muestra el resultado de este ajuste para el intervalo de confianza C.

Aplicando las expresiones desarrolladas en las ecs.(3) se determinaron los valores medios para la conductividad térmica y la resistencia térmica, obteniéndose $\lambda = 2.78 \text{ W/mK}$ y $R_b = 0.175 \text{ K/(W/m)}$ respectivamente.

Se realizó además una simulación del sistema mediante el programa EED (Earth Energy Designer). Para llevar a cabo dicha simulación hay que introducir en el programa datos constructivos, tales como tipo de material del subsuelo, caudal, carga térmica, etc. Como resultado se obtuvo un valor para la resistencia térmica $R_b = 0.14 \text{ K/(W/m)}$. La diferencia entre este resultado y el experimental puede deberse, entre otras cosas, a que el programa no toma en cuenta inhomogeneidades en el material del terreno que puedan existir en profundidad, tampoco considera el hecho práctico que la separación del tubo intercambiador de calor de las paredes de la perforación no es constante, factores estos que de acuerdo a la teoría y a un estudio de sensibilidad realizado, inciden en el tratamiento del problema.

Por último, en la figura 5 se compara la evolución de temperatura del fluido obtenida experimentalmente y la predicha aplicando la ec.(2). indicándose los intervalos de confianza A, B y C antes mencionados. En el intervalo A se observa una desviación considerable entre los datos experimentales y teóricos sustentando la decisión de no incluirlos en la determinación de los parámetros buscados a pesar de responder al criterio del 2% de error.

CONCLUSIONES

Se determinó, mediante un ensayo de respuesta térmica *in situ*, la resistencia y la conductividad térmica de un sistema intercambiador de calor en pozo (BHE), obteniéndose $R_b = 0.175 \text{ K/(W/m)}$ y $\lambda = 2.78 \text{ W/mK}$ respectivamente. Se comparó este valor de resistencia con $R_b = 0.14 \text{ K/(W/m)}$, obtenido mediante una simulación con el programa EED, explicándose la diferencia como debida a inhomogeneidades en profundidad en el material del subsuelo y asimetría en la distribución del intercambiador a lo largo del pozo, factores estos no tomados en cuenta en el modelo teórico base del programa.

Se explica la caída brusca de la temperatura evidenciada al final del intervalo B, como relacionada con condiciones climáticas y su influencia sobre el conducto intercambiador en los primeros 4m de profundidad.

Se fundamenta el hecho de haber desechado la serie de datos del intervalo A, mediante las diferencias apreciables entre ambas curvas, puestas en evidencia al comparar el perfil de temperatura experimental y teórico.

NOMENCLATURA

T_f	[°C]	Temperatura media del fluido caloportador
T_{sur}	[°C]	Temperatura no perturbada del subsuelo
Q	[kW]	Potencia de inyección.
H	[m]	Profundidad del pozo.
r_o	[m]	Radio del pozo.
c_r	[J/kg-°K]	Capacidad térmica del subsuelo.
a	[m ² /s]	Difusividad (λ/c_r).
γ		Constante de Euler (0.5772)
λ	[W/m-°K]	Conductividad térmica.
R_b	[°K/(W/m)]	Resistividad térmica entre el fluido caloportador y la pared del pozo.

REFERENCIAS

- ASHRAE (1998), Operating Experiences with Commercial Vertical Borehole Groundloop Heat Pump Installation, V.1, N°8.
- Eklöf C. (1996), TED a Mobile Equipment for Thermal Response Test, Master's Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- Eskilson P. (1987), Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Dep. of Mathematics, University of Lund, Sweden.
- Hellström G. (1991) Ground Heat Storage – Thermal Analyses of Duct Storage Systems, Dep. of Mathematics, University of Lund, Sweden.
- IEA (1995), Implementing Agreement on Energy Conservation Through Energy Storage, Annex 8,4th.
- Nordell B. (1994), Borehole Heat Storage Design Optimization, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- UTES: state of the art (1994), IF Technology bv, The Netherlands ISBN 90-802769-1-x.
- Sanner B., Nordell B. (1998), UTES with Heat pumps, IEA Heat Pump Newsletter, Vol. 16, N°2, p.10-14.

ABSTRACT

A Thermal Response Test performed on a Borehole Heat Exchanger 99m in depth at Erfurt, Germany, is presented. The thermal resistance between the fluid and the borehole wall and the thermal conductivity of the underground material are both determined comparing the experimental results with the mathematical model describing the thermal process taking place. The values obtained are $R_b = 0.175 \text{ °K/(w/m)}$ and $\lambda = 2.78 \text{ W/m °K}$, respectively. In contrast, a computer simulation of the borehole using the EED (Earth Energy Designer) software determines $R_b = 0.14 \text{ °K/(w/m)}$. Arguments explaining the features exhibited by the temperature evolution and the difference between experimental and simulated value for R_b are presented as well.

KEYWORDS

storage, thermal energy, thermal conductivity, thermal resistance, BHE, thermal response, UTES.