

ALMACENAMIENTO TÉRMICO SUBTERRÁNEO: ACOPLAMIENTO TÉRMICO AMBIENTAL EN ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA

Arturo Busso

Dpto. de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNNE.
Campus Libertad – Av. Libertad 5600 – 3400 Corrientes – Argentina.
Tel. 03783 473931 ext 129 – Fax. 03783 473930 – e-mail: ajbusso@exa.unne.edu.ar.

Manfred Reuss

Bavarian Centre for Applied Energies (ZAE Bayern) - Walther-Meißner Str. 6, D-85748 Garching – Alemania.
Tel. +49 089 356 250 30 – Fax. +49 089 356 250 23 – e-mail: reuss@muc.zae-bayern.de

RESUMEN

El diseño de intercambiadores de calor en subsuelo a ser usados en aplicaciones de almacenamiento subterráneo de energía térmica requiere conocer las propiedades térmicas del suelo, esto es, conductividad térmica λ , la resistividad térmica del pozo intercambiador R_b , y la temperatura no perturbada del subsuelo T_s .

La determinación in-situ de estas propiedades puede hacerse realizando el denominado Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) a un intercambiador de pozo existente. El análisis de datos recolectados se basa en modelos conceptuales que describen el proceso de transferencia térmica que tiene lugar entre el pozo y el subsuelo que lo rodea. El modelo teórico usualmente empleado se basa en la solución del problema de fuente térmica lineal infinita. Este modelo no toma en cuenta intercambios de energía que puedan ocurrir entre el sistema y el ambiente que lo rodea.

La experiencia de varios ensayos realizados, principalmente en Alemania, mostró que el acoplamiento ambiental se produce por el intercambio de energía térmica motorizado por la diferencia de temperatura existente entre el medio ambiente (interior y exterior al trailer) y las diferentes secciones del sistema. Para explicar el fenómeno de acoplamiento se propone una modificación a la solución logarítmica empleada basada en un modelo de balance energético simplificado. De esta forma fue posible determinar un coeficiente global promedio de pérdidas térmicas para el circuito hidráulico en el interior del trailer de 11 W/°C. Además, el análisis de sensibilidad revela que fluctuaciones en la potencia de inyección de corta duración se amortiguan por la inercia térmica propia del sistema, no así con las de larga duración, que afectan en forma proporcional a la respuesta en temperatura. Así mismo, se determinó que con el equipo utilizado la banda de error en las determinaciones de λ y R_b es de 6% y 11% respectivamente.

ABSTRACT

The design of Borehole Heat Exchangers (BHE) to be used in applications of underground storage of thermal energy requires the knowledge of the thermal properties of the soil, thermal conductivity λ , the thermal resistivity of the BHE R_b , and the undisturbed underground temperature T_s .

In-situ determination of these properties can be made performing the so called Thermal Response Test (TRT) to a BHE of an existing well. Analysis of the gathered data is based on conceptual models that describe the thermal heat transfer process taking place between the BHE and the underground that surrounds

it. The theoretical model usually employed is based on the solution of the line source problem and does not take into account any energy exchanges that might take place between the system and its surrounding ambient.

The experience gathered after performing several TRTs showed that the ambient coupling takes place due to the exchange of thermal energy motorized by the temperature difference between the ambient (inside and outside the trailer) and the different sections of the system. To explain the ambient coupling a modification to the line source logarithmic solution is proposed based on simplified energy balance model. By this, it was possible to determine a mean overall heat loss coefficient for the hydraulic circuit inside the trailer of 11 W/°C. A sensitivity analysis reveals that short-term fluctuations in the injection power are dumped by the thermal inertia characteristic of the system, not being the case with long-term duration, which affect linearly to the temperature response. Likewise, it was determined an error band in the determinations of λ and R_b of 6% and 11%, respectively applicable to the experimental set up used throughout the experiments.

Palabras claves: almacenamiento térmico, UTES, BHE, propiedades térmicas del subsuelo

INTRODUCCIÓN

Del interés creciente por el uso de bombas de calor acopladas al subsuelo (GCHPs – Ground Coupled Heat Pumps) en aplicaciones comerciales e institucionales a surgido la necesidad de contar con mejores herramientas de diseño y evaluación. La percepción de dificultad e incertidumbre asociada con el proceso de diseño hace que a menudo estos sistemas no reciban la suficiente atención y consideración en lo que a su aplicación práctica se refiere.

A pesar de la variedad de configuraciones de GCHPs existentes, los sistemas cerrados donde el intercambiador de calor con el terreno consiste en una serie de pozos verticales son los preferidos debido a que ocupan un área superficial mínima y por su facilidad de mantenimiento.

En particular, en sistemas de gran envergadura, se invierte un gran esfuerzo durante el proceso de diseño a fin de optimizar la cantidad de intercambiadores. Errores por exceso resultan en costos iniciales altos y errores por defecto pueden resultar en temperaturas del fluido caloportador entrante a la bomba de calor inadecuadas para el correcto funcionamiento del sistema.

Existen en la actualidad un número de herramientas de diseño usadas para el dimensionamiento de los intercambiadores de calor

(Ingersoll *et al.* 1954; Kavanaugh 1984; Eskilson 1987; Duerman and Kavanaugh 1991; Cane and Forgas 1991; IGSHA 1991; Spitler *et al.* 1996). En todas ellas la necesidad crítica es contar con un conocimiento preciso de las propiedades térmicas del terreno, ya que estos parámetros influyen fuertemente sobre el costo del sistema y su competitividad frente a sistemas convencionales para igual propósito.

Tradicionalmente, el método empleado para la estimación de estas propiedades térmicas ha sido, averiguar el tipo de subsuelo y extraer estos parámetros de tablas tal como Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems Field Manual (EPRI 1989). Esta metodología permite establecer una banda de valores esperados y queda librado al criterio y experiencia del diseñador decidir el valor particular a utilizar.

Este hecho, hizo necesario el desarrollo de un método mas preciso para la determinación de λ y R_b llegando a lo que hoy se conoce como Ensayo de Respuesta Térmica del Subsuelo (TRT – Thermal Response Test). Este procedimiento experimental permite determinar *in situ* tanto la conductividad térmica λ del subsuelo como la resistencia térmica R_b existente entre el pozo intercambiador y el subsuelo en inmediato contacto con el.

Básicamente, el ensayo consiste en hacer circular durante varios días un fluido caloportador a través del pozo/s intercambiador/res de calor y monitorear la temperatura de entrada y salida del sistema. Fig.1 muestra el detalle del circuito hidráulico utilizado.

Los parámetros térmicos de interés se determinan entonces en forma indirecta a partir de las mediciones de temperatura y flujo de calor aplicando un modelo teórico que describe el proceso de transferencia de calor en el subsuelo. Uno de los modelos actualmente usados en la evaluación de datos es el de fuente térmica lineal y cuyos detalles han sido presentados en una publicación previa (Busso *et al.* 2000).

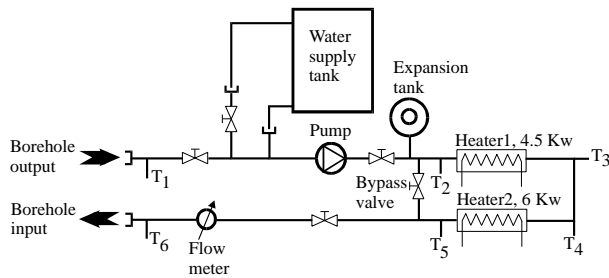


Figura 1.- Circuito hidráulico utilizado para el ensayo.

Dado que el TRT se realiza con un solo pozo, el modelo teórico empleado en la evaluación de datos no contempla interacciones entre pozos, asume potencia de inyección/extracción constante y no contempla acoplamiento térmico del sistema con el medio ambiente (Helltrööm G., 1991).

En ensayos reales las dos últimas condiciones no se verifican. En el primer caso, las fluctuaciones naturales en la red de suministro eléctrico a la que están conectados los calentadores afectan la potencia de inyección y, en el segundo, pese a la precaución de aislar térmicamente secciones del equipo expuestas a intercambio de calor con el ambiente, estas interacciones no pueden evitarse completamente como queda evidenciado de los datos experimentales obtenidos.

El presente trabajo expone el análisis de sensibilidad llevado a cabo para evaluar el grado de influencia que tienen las variaciones en la potencia de inyección y el acoplamiento térmico con el ambiente sobre la temperatura media del fluido en el pozo

intercambiador. El modelo propuesto para el análisis del acoplamiento térmico parte de un balance energético utilizando conceptos simples de intercambio de energía térmica.

MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto parte de la solución aproximada al problema de inyección de calor mediante fuente lineal. En él, la temperatura del fluido caloportador viene dada por:

$$T_f(\lambda, R_b) = \frac{\dot{Q}_{th}}{4\pi\lambda H} \left[\ln\left(\frac{4\lambda t}{r^2 C}\right) - \gamma \right] + \frac{\dot{Q}_{th}}{H} R_b + T_{sur} \quad [1]$$

Una versión de esta ecuación linealizada en $\ln(t)$ es la utilizada en la evaluación de datos experimentales. \dot{Q}_{th} representa la tasa media de energía térmica inyectada al pozo intercambiador y su determinación se realiza a partir de datos experimentales de caudal y temperatura de entrada y salida del fluido circulante a través del pozo intercambiador.

La foto 2 muestra el equipo utilizado, su distribución e interconexión con el pozo intercambiador. El trailer aloja al circuito hidráulico, estabilizadores de tensión y sistema de medición. Se aprecia además, en el exterior, los conductos aislados de acople entre el circuito hidráulico y el pozo intercambiador. La interacción térmica de los diversos componentes principales entre si y con el ambiente que los rodea se presenta en la Fig.3. y es la base del modelo propuesto.

Realizando un balance de energía:

$$\dot{Q}_{th} = \dot{Q}_e + \dot{Q}_p + \dot{q} + \dot{q}' \quad [2]$$

donde

\dot{Q}_{th} = Tasa de energía térmica transferida al terreno en el pozo intercambiador - Determinada indirectamente a partir de datos de temperatura de fluido medidos experimentalmente.

\dot{Q}_e = Tasa de energía eléctrica suministrada a los calentadores - Medido experimentalmente.

\dot{Q}_p = Tasa de aporte de energía proveniente de la bomba, fricción y otras fuentes - Variable de ajuste.

\dot{q} = Tasa de intercambio de energía entre el circuito hidráulico a temperatura media $T_{f,h}$ con el interior del trailer a temperatura T_{tr}

\dot{q}' = Tasa de intercambio de energía entre los conductos de interconexión a temperatura media $T_{f,p}$ con el medio ambiente exterior a temperatura T_{amb} .

Dado que en nuestro caso las pérdidas de calor se producen casi con exclusividad por convección, \dot{q} y \dot{q}' pueden determinarse aplicando la ley de Newton (Worsnop-Flint, 1964; Welty, 1978).

Así:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= -k_{in}(T_{f,h} - T_{tr}) \\ \text{y } \dot{q}' &= -k_{out}(T_{f,p} - T_{amb}) \end{aligned} \quad [3]$$

Con k_{in} y k_{out} coeficientes globales de pérdida de calor.

A pesar que la realidad física del fenómeno de transferencia de calor por convección indica que estos coeficientes dependen las

condiciones del aire en el ambiente que interactúa con el cuerpo (aire estanco, forzado, etc.), por simplicidad k_{in} y k_{out} se considerarán constantes y como variables de ajuste.



Figura 2.- Sistema de medición y conexión al pozo intercambiador.

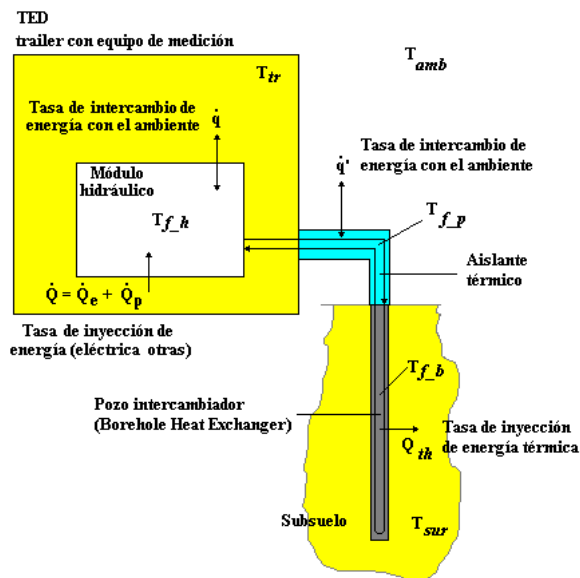


Figura 3.- Esquema de conexión e intercambio de energía térmica entre componentes y con el ambiente.

Reemplazando las expresiones en la ec.[1], se obtiene la dependencia de la temperatura del fluido con variaciones en el suministro de energía eléctrica, con la temperatura interior del

trailer y con la temperatura ambiente. Todo aporte extra de energía que pueda existir es considerado en el término \dot{Q}_p .

$$T_f(\lambda, R_b) = (\dot{Q}_e + \dot{Q}_p - k_{in}(T_{f-h} - T_{tr}) - k_{out}(T_{f-p} - T_{amb})) \left\{ \frac{\ln\left(\frac{A\lambda L}{r^2 C}\right) - \gamma}{4\pi\lambda H} + \frac{R_b}{H} \right\} + T_{sur} \quad [4]$$

RESULTADOS OBTENIDOS

La Fig.4 muestra los resultados para el ensayo de Nekarsulm, Alemania. Se observan superpuestas la comparación entre una curva típica de evolución de la temperatura media del fluido en el pozo intercambiador y la predicha por la teoría además de, las curvas de potencia eléctrica suministrada, Q_e , potencia térmica transferida, Q_{th} , y temperatura ambiente, T_{amb} . Durante este ensayo no se llevo registro de la temperatura en interior del trailer. Pueden apreciarse variaciones periódicas en la temperatura ambiente (curva azul clara) en oposición de fase con las correspondientes variaciones en el suministro eléctrico (curva amarilla) y la influencia que estas variaciones tienen sobre la temperatura del fluido (curva azul oscura). Durante la noche la tensión de línea aumenta por la merma en el consumo aumentando por consiguiente la potencia entregada por los calefactores, en cambio, la temperatura ambiente pasa por un mínimo.

La Fig.5 muestra los resultados para el ensayo de Markdorf, Alemania. Se puede apreciar que la temperatura en el interior del trailer se mantiene prácticamente 10°C por encima de la temperatura ambiente durante toda la duración de la experiencia.

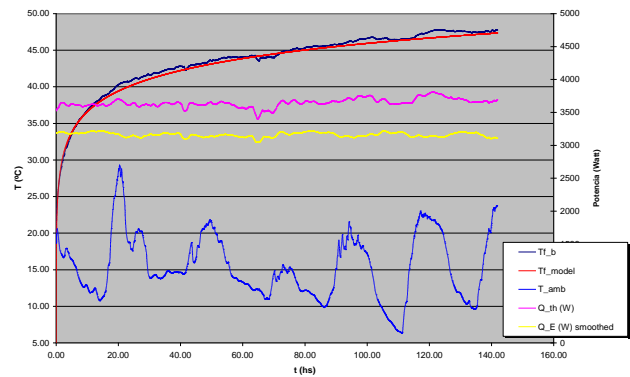


Figura 4.- Evolución temporal de las variables medidas. Superpuesta (trazo rojo) la curva teórica de temperatura de fluido predicha por la ec.[1].

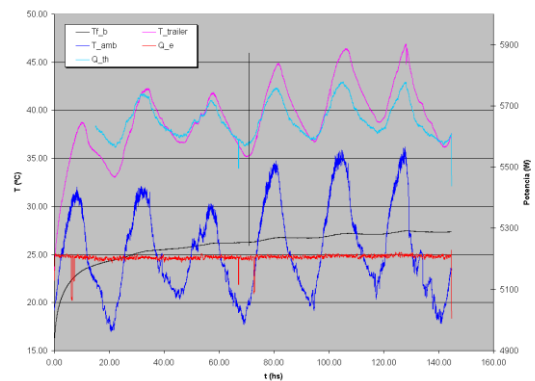


Figura 5.- Evolución temporal de temperaturas y potencias intercambiadas

Para evaluar cualitativamente la contribución que cada una de las variables tiene en las variaciones experimentadas por la temperatura del fluido, se realizó un estudio de sensibilidad analizándose diferentes casos que se visualizan en la Fig.6.:

Caso 1.- T_f predicha por la ec.[1] – Independiente tanto de T_{amb} como de Q_e . Q_{th} , λ y R_b son constantes. Q_{th} fué determinada de la manera usual a partir de las temperaturas del fluido a la entrada y salida del pozo intercambiador. λ y R_b fueron obtenidos mediante el método de ajuste

Caso 2.- T_f predicha por la ec.[4] – Asume solo Q_e variable. T_{amb} , Q_p , λ y R_b son constantes. T_{amb} se tomó igual a la temperatura ambiente media (15°C), $Q_p \sim 350W$ (determinada a partir del calentamiento del fluido producido durante un ensayo en vacío), λ y R_b fueron obtenidos mediante el método de ajuste.

Caso 3.- T_f predicha por la ec.[4] – Asume solo T_{amb} variable. Q_e se toma igual a la potencia eléctrica media medida, $Q_p \sim 350W$. λ y R_b fueron mantenidas constantes a valores obtenidos mediante el método de ajuste.

Caso 4.- T_f predicha por la ec.[4] – Asume T_{amb} y Q_e variables (curva roja). $Q_p \sim 350W$, λ y R_b fueron mantenidas constantes a valores obtenidos mediante el método de ajuste.

Caso 5.- T_f predicha por la ec.[4] – Asume Q_{th} variable (línea verde) – independiente de T_{amb} y Q_e . Q_{th} fué determinada para cada intervalo de tiempo de la manera usual a partir de las temperaturas del fluido a la entrada y salida del pozo intercambiador. λ y R_b fueron mantenidas constantes a valores obtenidos mediante el método de ajuste.

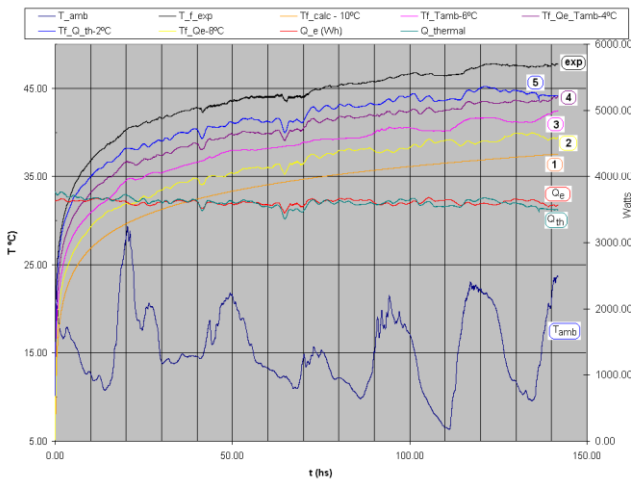


Figura 6.- Curvas de sensibilidad comparadas con la teórica (ec.[1]) y la experimental (línea negra)

La Fig.7. muestra los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto de acoplamiento térmico ambiental (ec. [4]) a los datos correspondientes al ensayo realizado en Markdorf. El fuerte acoplamiento térmico experimentado durante este ensayo tuvo dos motivos principales: altas temperaturas ambientales (verano) y el hecho que, debido a las características del lugar, los conductos de conexión entre el trailer y el BHE debieron ser enterrados cruzando una calle.

Procediendo de manera similar con datos recolectados durante otros ensayos, se determinó un coeficiente global promedio para las pérdidas térmicas del circuito hidráulico en el interior del trailer de 11 W K^{-1}

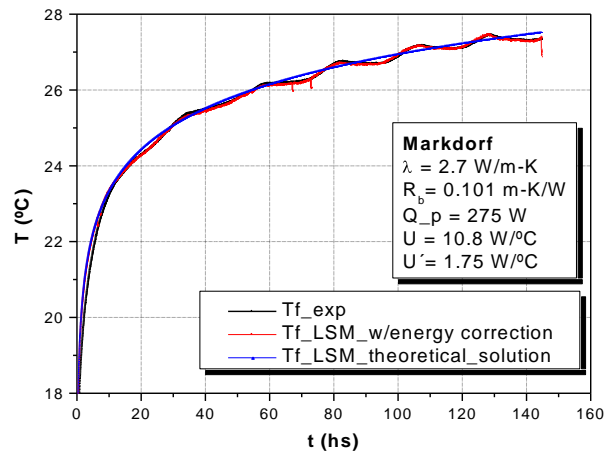


Figura 7.- Comparación entre datos experimentales y la solución del modelo de fuente lineal con y sin acoplamiento térmico ambiental.

De este análisis se observa que:

- 1.- Las fluctuaciones de larga duración exhibidas por la curva experimental, están principalmente gobernadas por fluctuaciones correspondientes de larga duración en la temperatura ambiente (caso 3) y, en menor medida, por fluctuaciones en el suministro de energía eléctrica.
- 2.- Las fluctuaciones de corta duración exhibidas por la curva experimental están principalmente gobernadas por fluctuaciones correspondientes de corta duración en el suministro de energía eléctrica (caso 2).
- 3.- El efecto combinado de las fluctuaciones producidas por ambas variables (caso 4) dan una curva teórica con características similares a las presentadas por la curva experimental.
- 4.- Las variaciones de corta duración son amortiguadas en gran medida por la inercia térmica del sistema como se evidencia comparando las curvas para el caso 4 con la **exp.**

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

El objetivo del análisis de sensibilidad fue evaluar el error experimental en la determinación de λ y R_b debido al uso del modelo de fuente lineal. A tal fin, cada parámetro medible involucrado en la solución del modelo fue hecho variar en forma independiente dentro de su banda de error experimental. La Fig.8 muestra el correspondiente efecto sobre λ y R_b . De esta manera se dedujo una banda de confianza para la determinación de λ y R_b de $\pm 6\%$ y $\pm 11\%$ respectivamente.

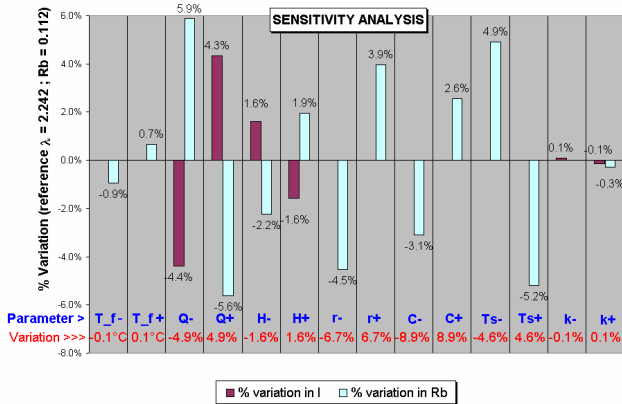


Figura 8.- Efecto de la variación independiente de cada parámetro medible en la determinación de λ y R_b

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos aplicando el modelo de acoplamiento ambiental y el análisis de sensibilidad a la ec. [1] se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se determinó un coeficiente global promedio para las pérdidas térmicas del circuito hidráulico en el interior del trailer de 11 W K^{-1}
- Se relacionaron las fluctuaciones en las diferentes variables experimentales con las características presentadas por la curva de respuesta térmica experimental.
- A partir de los errores experimentales propios del sistema de medición se dedujo una banda de confianza para la determinación de λ y R_b de $\pm 6\%$ y $\pm 11\%$ respectivamente.

REFERENCIAS

Ingersoll, L. R., O.J. Zobel, and A.C. Ingersoll (1954). Heat conduction with engineering, geological, and other applications. New York: McGraw-Hill.

Kavanaugh, S.P. (1984), Simulation and experimental verification of vertical ground-coupled heat pump system. Ph.D dissertation, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.

Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes. Doctoral thesis, Lund University, Sweden.

Deerman, J.D., and S.P. Kavanaugh (1991). Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using cylindrical heat sour solution. ASHRAE Transactions 97(1):287-295.

Cane, R.L.D., and Forgas A. (1991). Modelling of ground source heat pumps performance. ASHRAE Transactions 97(1):909-925.

IGSHPA. (1991). Design and installation standards, J.E. Bose, ed. Stillwater, Okalhoma: International Ground Source Heat Pump Association.

Spitler, J.D., C. Marshall, R. Delahoussaye, and M. Manicham (1996). Users guide of GLHEPRO. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Stillwater.

EPRI (1989). Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems Field Manual. J.E. bose, ed. Electric Power Research Institute Special Report, EPRI CU-6600.

Busso A., Reuss M., Müller J., Sograri N. (2000), Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica: Resultados de

un Ensayo de Respuesta Térmica del Subsuelo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, N° 1.

Helltröom G. (1991) Ground Heat Storage – Thermal Analyses of Duct Storage Systems, Dep. of Mathematics, University of Lund, Sweden.

Worsnop B. L., Flint H. T., (1965). Curso Superior de Física Practica Tomo I, Editorial EUDEBA.

Welty James, (1978), Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería, Ed. Limusa.