

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODULO TRNSYS PARA EVALUACION DE DATOS DE RESPUESTA TERMICA DEL SUBSUELO: TYPE 300

Cabral Guillermo, Busso Arturo

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.

RESUMEN

El presente trabajo describe la implementación de una subrutina de cálculo bajo TRNSYS, denominada TYPE 300. La misma posibilita la evaluación de datos experimentales de ensayos de respuesta térmica del subsuelo de una manera rápida, flexible y confiable. Para determinar la conductividad térmica del subsuelo (λ_s), conductividad térmica del material de relleno del pozo intercambiador de calor (λ_g) y resistividad del pozo intercambiador (R_b), el modelo de cálculo utilizado se basa en la solución numérica del problema de transferencia de calor en un pozo intercambiador de calor unidimensional, acoplado a un algoritmo de ajuste paramétrico de variables de Nelder-Mead. Como complemento, la subrutina realiza una determinación del error acumulado, parámetro indicador comparativo de la eficacia del modelo y genera un informe, en forma de archivo de texto, con datos constructivos del pozo intercambiador de calor, valores de los parámetros calculados, tabla de temperaturas experimentales, calculadas y error cuadrático.

Palabras clave: Nelder-Mead, almacenamiento subterráneo de energía térmica, transmisión de calor, TRNSYS

INTRODUCCION

El almacenamiento subterráneo de energía térmica (Underground Thermal Energy Storage - UTES) a nivel mundial ha tenido en los últimos años un empuje particular (IEA, 1995; ASHRAE, 1998) como consecuencia de políticas orientadas hacia sistemas energéticamente eficientes. Una de las formas de UTES (Underground Thermal Energy Storage) consiste en una serie de pozos intercambiadores de calor (Borehole Heat Exchanger - BHE) interconectados por los que circula un fluido caloportador. La Fig.1 muestra uno de tales pozos intercambiadores. Debido a la inversión requerida para poner en práctica este tipo de sistemas, es de suma importancia desarrollar métodos que permitan su diseño y optimización antes de encarar su construcción. Una de las maneras de lograr este objetivo es mediante cálculo y simulación y para ello, la conductividad térmica, λ , del subsuelo y la resistencia térmica, R_b , entre el fluido caloportador y la pared del pozo, son dos parámetros de vital importancia y por ende deseable su determinación.

En este contexto, el Ensayo de Respuesta Térmica (ERT) es un procedimiento experimental que permite determinar *in situ* tanto λ como R_b . El ensayo, consiste en hacer circular durante varios días un fluido caloportador a través del pozo/s intercambiador/res de calor manteniendo constante la inyección de potencia, monitoreando la temperatura de entrada y salida del sistema. Estos datos son luego analizados mediante modelos matemáticos que describen la física del problema, entre los cuales se encuentran, el método gráfico convencional de determinación de la pendiente y métodos numéricos más precisos. El primero se basa en una aproximación de la solución analítica del problema de fuente de calor lineal (LSM), cuya principal suposición es que durante el experimento la potencia de inyección o extracción de calor se mantiene constante y conocida (Helltröm G., 1991), condición raramente cumplida en la realidad debido a diversos factores (Busso, et al, 2001; Busso, et al, 2003). Por el contrario, los métodos numéricos reproducen en forma más detallada la realidad del proceso térmico por lo que resultan más apropiados y precisos para la evaluación.

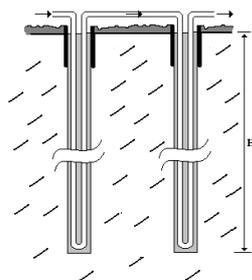


Figura 1.- Detalle de sistema de pozos intercambiadores de calor (Borehole Heat Exchanger - BHE)

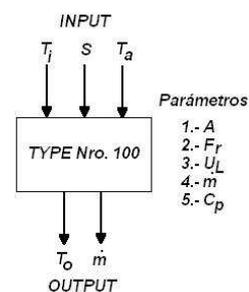


Figura 2.- Diagrama de flujo para un TYPE genérico

El presente escrito expone los resultados obtenidos al implementar un módulo de cálculo bajo TRNSYS a fin de proporcionar al usuario una herramienta rápida, confiable y versátil a la hora de realizar evaluación de datos de ERT. Por la forma de estructurada de TRNSYS, un módulo o subrutina de cálculo se denomina TYPE y lleva asociado un código numérico único, en este caso particular el TYPE 300. Este TYPE, codificado en FORTRAN, se basa en un modelo solución numérica del problema de transferencia de calor unidimensional complementado con un algoritmo de ajuste paramétrico Nelder-Mead. Los detalles del modelo pueden ser encontrados en una publicación anterior de los autores (Cabral et al, 2004). La principal ventaja del mismo es que contempla potencia de inyección/extracción variable siendo, por tanto, capaz de reproducir con mayor detalle la realidad física del experimento y obtener una temperatura media de fluido con mucho menos error que el modelo analítico aproximado de fuente lineal (Line Source Method - LSM). Este TYPE se desarrolló en el marco de un proyecto de cooperación técnica con el ZAE Bayern de la Universidad de Munich y se encuentra actualmente bajo evaluación.

DESCRIPCION DEL MODULO

TRNSYS es un programa para simulación de estados transitorios de sistemas con una estructura modular. El programa es adecuado para el análisis detallado de sistemas cuyo comportamiento es dependiente del paso del tiempo. Además, su naturaleza modular le confiere una gran flexibilidad y facilita la incorporación al programa, de modelos matemáticos originalmente no incluidos en el paquete de librerías estándar de TRNSYS [1]. Mas aún, el lenguaje base de TRNSYS es FORTRAN por lo que lo hace especialmente útil en el ámbito de trabajo científico.

En TRNSYS un sistema se define como un conjunto de componentes interconectados de tal manera de poder cumplir con una tarea específica. La interconexión de estos componentes se lleva a cabo utilizando un lenguaje especial en un editor simple. El código así generado es interpretado internamente por el programa TRNSHELL durante la ejecución. Además, en TRNSYS cada uno de estos componentes, denominados TYPE, representa una rutina de cálculo y posee características particulares, por ej. parámetro fijos, datos de entrada (INPUTS), necesarios para que el cálculo tenga lugar y, como resultado del mismo, los datos de salida (OUTPUTS). La figura 2 ilustra un diagrama de flujo para un TYPE genérico:

Siguiendo esta concepción, se implementó un modulo, TYPE 300, que permite la simulación numérica de transferencia de calor unidimensional por optimización mediante el algoritmo de Nelder-Mead de los coeficientes eficaces de conducción de calor, esto es, la conductividad térmica del subsuelo (λ_s), conductividad térmica del material de relleno del pozo intercambiador de calor (λ_g) y resistividad (R_b) del pozo intercambiador. La figura 3 muestra el diagrama de flujo correspondiente al TYPE 300. Una descripción detallada del modelo puede encontrarse en Cabral et al, 2004.

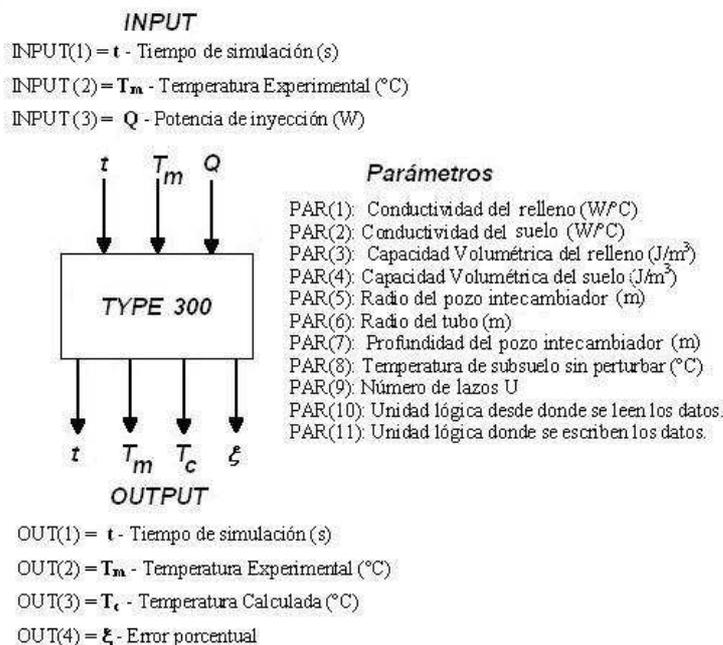


Figura 3.- Diagrama de flujo del TYPE 300

Datos de entrada: Dentro del código debe especificarse, en una instrucción ASSIGN, el nombre y ruta del archivo de entrada que contenga el tiempo experimental en segundos, temperatura experimental en $^{\circ}C$ y la potencia de inyección de calor en Vatios. El número de unidad lógica se pasa al módulo a través del PAR(10). El módulo lee el fichero hasta encontrar un EOF (End Of File) y asume que ese es el número de datos a procesar. El fichero debe ser texto plano.

Datos de Salida: Se especifica en una instrucción ASSIGN el nombre y ruta del fichero donde se guardarán los datos de salida. La unidad lógica debe ser pasada al PAR(11). Los resultados guardados en el archivo tienen tres secciones. La primera son los detalles constructivos del BHE (pozo intercambiador de calor - Borehole Details), como las capacidades volumétricas

de la mezcla de relleno (grout) y del subsuelo (soil), radio y profundidad del BHE y potencia media de inyección. La segunda sección consta de los resultados tales como la conductividad de la mezcla de relleno (grout) y del subsuelo (soil), la resistencia térmica R_b y el error cuadrático acumulado. La tercera sección es una tabla con el grueso de los resultados obtenidos. Se lista el tiempo de simulación (en horas), la temperatura experimental ($^{\circ}\text{C}$), la temperatura calculada ($^{\circ}\text{C}$) y el error porcentual.

Funcionamiento Interno: El TYPE 300 usa internamente una subrutina de cálculo que simula la transferencia de calor unidimensional de un tubo de radio equivalente al del circuito de los tubos en U (ver Fig.1) por los que circula el fluido caloportador (Cabral et al, 2004). Esta subrutina es llamada por otra, denominada MEAD, que realiza la optimización de parámetros mediante el método de Nelder-Mead. Este método de optimización consiste en la creación de un simplex de tres puntos, pues en este caso estamos optimizando dos parámetros, la conductividad del relleno (grout) y del subsuelo (soil), que mediante transformaciones en el plano minimiza el error cuadrático acumulado hasta que los puntos del simplex llegan a la coincidencia.

La primera vez que TRNSYS llama al TYPE 300 éste llama a la subrutina MEAD para que encuentre los parámetros optimizados y realice la secuencia de cálculo de las temperaturas. En el siguiente intervalo de tiempo (time step) el programa simplemente envía los resultados obtenidos para cada tiempo a través de las variables de salida (OUTPUT) las cuales son:

- OUT(1) = t - Tiempo de simulación (s)
- OUT(2) = T_m - Temperatura Experimental ($^{\circ}\text{C}$)
- OUT(3) = T_c - Temperatura Calculada ($^{\circ}\text{C}$)
- OUT(4) = ξ - Error porcentual

```

ASSIGN C:\Trnwin\mywork\nsu.lst          6
ASSIGN C:\Trnwin\mywork\nsu.TXT         16
ASSIGN C:\TRNWIN\mywork\nsu_res.TXT     18
START=0
STOP=118
STEP=0.0166666
SIMULATION START STOP STEP
TOLERANCES 0.01 0.1
*           Max iterations; Max warnings; Trace limit;
*LIMITS     30      100      30
*           TRNSYS output file width, number of characters
WIDTH       132
PARAMETERS 11
LU=16
LW=18
KG=1.47
KS=2.32
CG=3500000
CS=2300000
RB=0.075
H=32.0
TSUR=13.86
NLOOP=2
R0=0.013
*****
UNIT 3 TYPE 300
PARAMS 11
KG KS CG CS RB R0 H TSUR NLOOP LU LW
*****
UNIT 65 TYPE 65 ONLINE
PARAMETERS 14
2 1 0 60 -5 20 1 1 3 1 3 0 2 0
INPUTS 3
3,2 3,3 3,4
Texp Tcalc error
LABELS 4
 $^{\circ}\text{C}$  %
Temperaturas (C)
Error (%)
END

```

Figura 4.- el formato típico del código para una corrida típica

Estas salidas del TYPE 300 son pasadas a salida grafica en pantalla mediante el módulo TYPE 65 que viene con las librerías del TRNSYS. La figura 4 presenta el formato del código para una corrida típica.

RESULTADOS

La figura 5 muestra el resultado obtenido para una corrida realizada con una serie de datos experimentales recolectados durante un ERT en Nakarsulm, Alemania. Se aprecia la buena concordancia entre los valores experimentales de la temperatura media del fluido (curva roja) y los correspondientes valores de las temperaturas calculadas (curva azul) luego del ajuste paramétrico. En la gráfica se observa además la evolución del error porcentual (curva fucsia) pudiéndose notar que el error es máximo durante las primeras horas del ensayo y va disminuyendo a medida que el tiempo pasa. Esto se explica en el hecho que, a pesar que la solución numérica reproduce con mayor detalle el proceso de transferencia de calor que el método de fuente lineal (LSM), aún se aparta de la realidad física debido a que estamos trabajando con un modelo unidimensional. La realidad física es un poco más compleja que esta simplificación dado que el BHE está compuesto por dos canales de flujo a contrasentido a través de los cuales se inyecta energía a un medio (subsuelo) que tampoco es homogéneo.

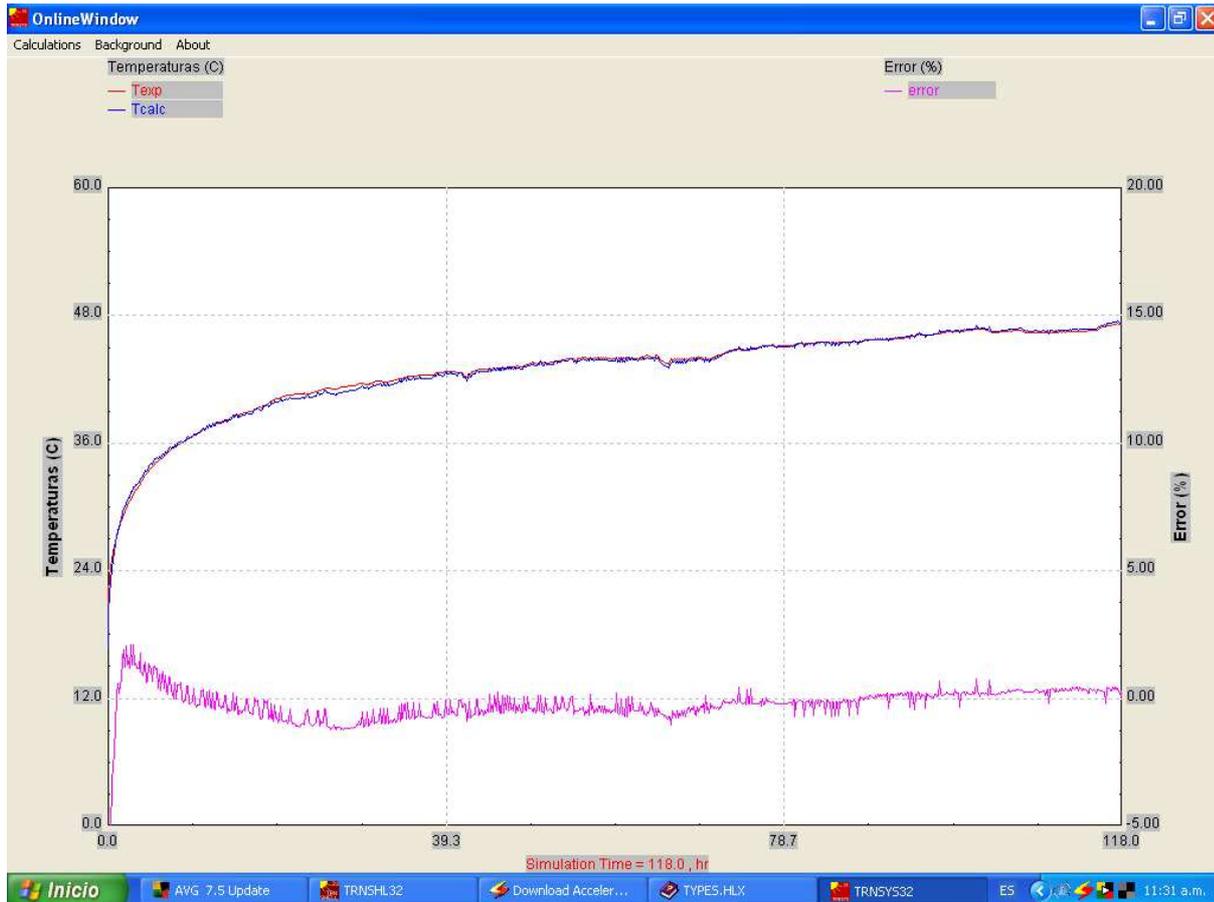


Figura 5.- Presentación gráfica en pantalla de los resultados de evaluación y ajuste mediante el TYPE 300

En la Figura 6 se presenta el formato del archivo de salida con las tres secciones antes mencionadas: La primera con los detalles constructivos del BHE (pozo intercambiador de calor - Borehole Details), la segunda sección con los resultados del cálculo (conductividad de la mezcla de relleno (grout) y del subsuelo (soil), la resistencia térmica R_b y el error cuadrático acumulado) y la tercera sección la tabla con el grueso de los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Se implementó un modulo bajo TRNSYS que posibilita realizar la evaluación de datos experimentales de ensayos de respuesta térmica de una manera rápida, flexible y confiable. El modelo de cálculo utilizado esta basado en la solución numérica del problema de transferencia de calor en un BHE (pozo intercambiador de calor) unidimensional, acoplado a un algoritmo de ajuste paramétrico de NELDER-MEAD para determinar la conductividad térmica del subsuelo (λ_s), conductividad térmica del material de relleno del pozo intercambiador de calor (λ_g) y resistividad (R_b) del pozo intercambiador.

El módulo además realiza una determinación del error acumulado y genera un reporte con datos constructivos del pozo intercambiador de calor, valores de los parámetros calculados y tabla de temperaturas experimentales, calculadas y error cuadrático.

Este modelo numérico utilizado ya ha sido probado con éxito anteriormente con un número considerable de series de datos (Busso A., Reuss M., 2001).

BOREHOLE DETAILS			
Volumetric Heat Capacity of Grout = 3500000.0 J/K-m ³			
Volumetric Heat Capacity of Soil = 2300000.0 J/K-m ³			
Undisturbed Ground Temp = 13.86 C			
Number of loops = 2			
Pipe radius = .0130 m			
Borehole radius = .0750 m			
Depth = 32.00 m			
Average Power Q _{av} = 3645.40 W/m			
RESULTS			
Grout Conductivity = 1.45 W/K-m			
Soil Conductivity = 2.38 W/K-m			
Thermal Resistance R _b = .1112 K-m/W			
Accumulated quadratic error = 486.339			
Time (hours)	T Experimental	T calculated	Error %
.0000	19.2079	15.8709	-17.372890
.0000	20.1424	16.8862	-16.165860
.0167	20.6700	17.4014	-15.813440
.0333	20.8975	18.2470	-12.683500
.0500	20.9637	18.6158	-11.199630
.0667	21.0622	19.1621	-9.021380
.0833	21.4451	19.1864	-10.532180

Figura 6.- Archivo de salida y formato de presentación de datos

REFERENCIAS

[1] <http://www.trnsys.com/>

ASHRAE (1998), Operating Experiences with Commercial Vertical Borehole Groundloop Heat Pump Installation, Vol. 1, N°8.

Busso A., Reuss M. (2001), Ensayo De Respuesta Térmica Del Subsuelo: Método Grafico De La Pendiente Vs. Ajuste Con Dos Parámetros Variables. Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. SeCyT – UNNE. T.54.

Busso A, Reuss M. (2003). Almacenamiento Térmico Subterráneo: Acoplamiento Térmico Ambiental en Ensayos de Respuesta Térmica. A. Memoria de la XXVII Semana Nacional de Energía Solar. AQC16-01: México.

Cabral G., Torazza A., Busso A. (2004). Modelización Matemática de un Pozo Intercambiador de Calor Vertical en el Subsuelo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 8, N° 2, 2004. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

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

IEA (1995), Implementing Agreement on Energy Conservation Through Energy Storage, Annex 8,4th.

ABSTRACT

The present work describes the implementation of a calculation module under TRNSYS, the the TYPE 300, that makes the evaluation of experimental data from underground Thermal Response Test fast, flexible and reliable. The calculation model is based on the one dimensional numeric solution of the heat transfer problem present in a Borehole Heat Exchanger - BHE, coupled to a Nelder-Mead algorithm for parameter fitting to determine the thermal conductivity of the underground, thermal conductivity of the grout and the resistivity (R_b) of the Borehole Heat Exchanger. As a complement, the TYPE 300 module calculates the accumulated error, which is a comparative indicator of the effectiveness of the model and generates a report comprising Borehole Heat Exchanger data, the calculated parameters and a table with experimental and predicted temperatures and the quadratic error.

Key words: underground thermal energy storage, borehole heat exchanger, heat transfer, TRNSYS.