TESIS

Calefacción utilizando el subsuelo como fuente de energía almacenada

Maestrando

Ing. Valentín Antonio Stefanini

E-Mail: stefanini28@hotmail.com. ar

Director de Tesis

Mg. Jorge Follari

Co Director de Tesis

Mg. Nahuel Salvo

DEDICATORIA

A MI MADRE, ROSA ABACA,

QUIEN CON SU HUMILDE SABIDURÍA

SUPO CONTENERME EN MIS MOMENTOS DE DESCONCIERTO.

EN SU RECUERDO, LE DEDICO ESTA TESIS.

Tu hijo, Valentín.

AGRADECIMIENTOS

A MI PADRE, ANTONIO JOSÉ,

QUE SUPO PRESIONAR EN EL MOMENTO OPORTUNO.

A MI AMOR,CRISTINA',

QUIEN SIEMPRE ME ACOMPAÑO, ALENTÓ Y COMPRENDIÓ,

EN BUENOS Y MALOS MOMENTOS.

A MIS HIJOS,

MARÚ, FLOR y VALEN,

QUE ME CONTUVIERON.

A MI DIRECTOR, JORGE,

QUIEN ME PERMITIÓ TRABAJAR A GUSTO.

A MI AMIGO, DANIEL,

QUIEN ME ENTUSIASMO A CURSAR ESTA MAESTRÍA.

A MI GRAN MAESTRO,

ING. ÁNGEL ANTONIO ROSSI,

QUIEN SUPO INCULCAR EN MI, SU INFINITO SABER

Y PASIÓN A LA DOCENCIA.

“LA TIERRA NO ES UNA HERENCIA DE NUESTROS PADRES,
SINO UN PRÉSTAMO DE NUESTROS HIJOS”

Antiguo Proverbio Hindú

"DE LA NADA NO NACEN LAS COSAS.
DESPUÉS DE NACER TAMPOCO PUEDEN TRANSFORMARSE EN LA NADA."

Tito Lucrecio Caro (95-55 a.C.),
"De rerum Natura”

Abreviaturas

GSHP… Ground Source Heat Pump

BHE… Borehole Heat Exchanger

GHE… Ground Heat Exchanger

TRT… Thermal Response Test

LSM… Line Source Model

λeff… Coeficiente de Conductividad Térmica efectiva [W/mK]

RB…. Resistencia térmica de pozo [K/(W/m)]

Nomenclatura

t_b: tiempo mínimo, a partir del mismo se evalúa el TRT (seg)

r: radio de la perforación [m]

α: difusividad térmica [m2/s]

Tr(t): temperatura en el tiempo "t".

Tr: temperatura estacionaria originada por la temperatura media del fluido inyectado.

Tsur: temperatura de suelo no perturbado.

Trq(t): cambio de temperatura debido a la desviación de la temperatura media del fluido.

T(r,t): es la temperatura en el punto (x,y,z)

Φ(t'): q, potencia térmica en función del tiempo y es constante

Et(τ) nos da el cambio de temperatura con el tiempo a la distancia radial 'r' del centro del pozo.

γ: 0,5772 (Const. de EULER)

Tf (t): Temperatura media del fluido portador de energía térmica (Tentrada + Tsalida) / 2

Tro (t): Temperatura de la roca en la pared del pozo

H: Representa el largo de la perforación o la longitud efectiva del intercambiador en (m).

Q: Representa la potencia promedio de calor inyectado.

q = Q/H: Velocidad de inyección de calor por unidad de longitud de la perforación

C = Caudal (m3/seg)

V= Viscosidad Cinemática (m2/seg)

D= Diámetro intercambiador geotérmico

TA: Temperatura ambiente 1

TB: Temperatura de agua en la pileta

TC: Temperatura salida tanque de expansión

TD: Temperatura entrada tanque de expansión

TE: Temperatura salida del intercambiador

TF: Temperatura entrada del intercambiador

TH: Temperatura ambiente 2

Índice de figuras

1	Equipo de prueba para un TRT (Sanner et al. 2005)	17
2	Curvas de temperatura medida con bajo (arriba) y fuerte (abajo) la influencia del clima. (Sanner et al. 2005)	18
3	Representación de las funciones [Gt] y [ln (4t) – y] con respecto a τ.	26
4	Esquema de una sonda geotérmica vertical	27
5	Perfil de temperatura de suelo	36
6	Esquema del dispositivo montado en la Provincia de San Luis, en la República Argentina	40
7	Evolución de la temperatura media del fluido en el intercambiador geotérmico	46
8	Evolución de la temperatura media del fluido con criterio de tiempo	47
9	Evolución de Rb en función del tiempo total	48
10	Temperatura de entrada/salida sin perturbación del intercambiador	50
11	Evolución total de la temperatura media entrada/salida en función del ln (t) medido en horas	51

12	Evolución con criterio de tiempo de la temperatura media entrada/salida en función del ln (t) en horas	57
13	Representación de las funciones [Gt] y [ln (4t) – y] con respecto a τ	52
14	Esquema de resistencia térmica Rb (ºK / (W / m)).	53
15	Evolución de Rb con criterio de tiempo en función del ln (t) medido en horas	54
16	Evolución de la temperatura media del fluido (curva azul) y superpuesta la curva de ajuste paramétrico (curva roja)	56

Índice de tablas

1	Contraste de los termómetros	43
2	Datos de la instalación	43
3	Valores de temperatura de todo el sistema montado, al comienzo de la carga y circulación del fluido por todo el circuito hidráulico	44
4	Datos del segundo pre ensayo	44
5	Datos del segundo pre ensayo, con glicol	45
6	Datos del primer ensayo	49
7	Resumen de los resultados del primer ensayo	49
8	Datos del segundo ensayo	55
9	Resumen de los resultados del segundo ensayo	55
10	Extracto norma VDI 4640	57
11	Resultado de los TRT de Argentina	59
12	Results of multiple TRT on the same site (Mol TRT workshop in 2000 and two projects in Germany)	59

Tabla de contendidos

AGRADECIMIENTOS

ABREVIATURAS

NOMENCLATURA

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Capítulo 1.-INTRODUCCIÓN

1.1.- Aspectos generales sobre geotermia de baja entalpía 13

1.2.- Objetivos generales 13

1.3.- Objetivos específicos 14

1.4.- Hipótesis 14

Capítulo 2.- MARCO CONCEPTUAL

2.1.- Introducción 15

2.2.- TRT Ensayo de respuesta térmica 16

2.3.- Técnica de determinación de pendiente 19

2.4.- Modelo matemático 22

2.5.- Resistencia térmica 29

2.6.- El proceso estacionario 30

2.7.- Resumen de las ecuaciones 32

2.8.- Método de la pendiente 33

2.9.- Temperatura de suelo no perturbado 35

Capítulo 3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Generalidades 38

3.2.- El banco de ensayo 39

3.3.- Realización del banco de ensayo 39

3.4.- Ensayo 43

3.5.- Ajuste paramétrico de los datos experimentales 55

3.6.- Enfoque de la planificación 56

Capítulo 4.- RESULTADO y DISCUSIÓN 59

CONCLUSIONES 61

REFERENCIAS 62

ANEXOS

Anexo1 Galería de fotos

Anexo2 Trabajo aceptado en Islandia

Resumen

El crecimiento exponencial de la población mundial, el acceso de habitantes de bajos recursos a los beneficios de la energía eléctrica, el desarrollo acelerado de algunas naciones y la consigna de disminución de la emisión de gases efecto invernadero, generan una problemática creciente demanda de energía. Este problema energético mundial, no solo se resuelve generando nuevas fuentes de energía, si no también haciendo un uso racional y eficiente de la misma. En el año 2015 el consumo eléctrico en Argentina per cápita fue de 3151 kWh de los cuales el 40% se utilizan en el hogar. De aquel, el 40% se utiliza para climatización. Por lo cual la demanda energética para la climatización es elevada.

Como la tierra es un planeta rocoso con una gran masa sólida caracterizada por numerosas formaciones geológicas, por sus propiedades se comporta como un gran colector y/o acumulador de energía debido a su gran capacidad calorífica y a su baja conductividad térmica. A poca profundidad se capta esta energía térmica acumulada y se la utiliza para la climatización de viviendas, edificios, etc. Esta es una energía renovable de peculiar característica, que se encuentra disponible en cualquier sitio y se la conoce como aprovechamientos geotérmicos de baja entalpía. Estos aprovechamientos constan básicamente de un intercambiador de energía enterrado en el subsuelo unido a una bomba de calor.

El punto de partida para diseñar un emprendimiento geotérmico de baja entalpía es conocer la longitud del intercambiador de calor de subsuelo (GHE) ground heat exchanger. Para ello, se debe conocer la capacidad efectiva de transferencia de calor, dimensión, configuración, material de relleno, etc. del pozo. El comportamiento efectivo de un intercambiador enterrado se lo conoce, determinando el coeficiente de conductividad térmica efectivo de subsuelo y la resistencia térmica de pozo "in situ", objetivo del

presente trabajo.

Para ello se realizó un intercambiador particular en la Ciudad de San Luis República Argentina, se procedió a efectuar un ensayo de respuesta térmica de suelo (TRT) estándar, se tomaron los datos de forma manual, se los procesó y se obtuvo el coeficiente de conductividad térmica efectiva de subsuelo como también la resistencia térmica de pozo, para el diseño propuesto.

Obtenido el coeficiente se lo comparó con otros coeficientes de distintos ensayos estándar registrados, y se observó que el mismo está dentro del rango.

En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo de respuesta térmica de un intercambiador particular, partiendo de un modelo matemático de test estándar.

Se finalizó con una comparación visual del coeficiente de conductividad térmica que se obtuvo en este ensayo particular, con otros coeficientes de distintos ensayos registrados.

Se concluyó que los resultados obtenidos al aplicar el método estándar a otro tipo de intercambiador, están dentro del rango. Para un emprendimiento comercial, el método empleado no difiere sustancialmente en la determinación del coeficiente de conductividad térmica efectiva "in situ".

Estructura del trabajo

La presente tesis se ha estructurado en cuatro capítulos.

En el capítulo I. Introducción, al sistema de climatización que utiliza geotermia de baja entalpía, se definen objetivos generales y específicos. Se plantea la hipótesis que llevo a la realización del presente trabajo.

En el capítulo II. Marco conceptual, en que se basa esta tesis, haciendo referencia a los distintos aspectos que conlleva a la realización un TRT estándar.

En el capítulo III. Materiales y métodos, se expone todos los aspectos sobre el diseño, construcción y ejecución del TRT "in situ" propuesto, surgiendo a partir de esto la metodología adoptada.

En el capítulo IV. Resultado y discusión, donde se realiza una comparación visual del resultado obtenido en la presente investigación con respecto a resultados obtenidos en otros TRT registrados y se observa que el coeficiente está dentro del rango.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1.- Aspectos sobre geotermia de baja entalpía

Es una fuente de energía renovable, que aprovecha la energía térmica del subsuelo de forma ecológica para la climatización. Siendo uno de los pocos sistemas para la obtención de refrigeración, calefacción y agua caliente sanitaria, que se utiliza en viviendas familiares, pequeños emprendimientos, invernaderos, en medianas y grandes instalaciones. Se llega a ahorrar hasta un 75% de la factura de energía eléctrica, por ende, reduciendo las emisiones de CO2.

A estos se los conoce como sistemas de bombas de calor de tierra (GSHPs) Ground source heat pumps system, es la aplicación geotérmica más relevante ya que alrededor de 3 millones de instalaciones se han instalado en el 2010, según International Energy Agency (IEA 2010). La misma incluye una unidad convencional de bomba de calor y un grupo de intercambiadores de calor de pozo, borehole heat exchangers (BHEs).

Aquí se presenta una forma distinta de realizar un intercambiador geotérmico utilizando una excavación pre existente para otro objetivo, limitando al intercambiador en su disposición. Mediante un ensayo se determinó el coeficiente de conductividad térmica. Este coeficiente "in situ" es el primero determinado en la provincia.

1.2.- Objetivo general

Obtener el coeficiente efectivo de conductibilidad térmica y la resistencia térmica de pozo "in situ" de un intercambiador horizontal

particular realizado en San Luis Argentina.

1.3. - Objetivos específicos

- ✓ Recolectar, agrupar conocimientos y antecedentes de ensayos similares mundiales.
- ✓ Determinar el coeficiente de conductividad térmica λ_{eff} y la resistencia térmica de pozo R_B
- ✓ Describir aspectos tanto teóricos como prácticos del ensayo.
- ✓ Comparar y analizar los resultados con otros ensayos.
- ✓ Proponer un sistema alternativo de TRT estándar.

Actividades y acciones para alcanzar los objetivos

- ➢ Realizar un intercambiador geotérmico horizontal particular.
- ➢ Realizar un test de respuestas térmicas "in situ".

1.4.- Hipótesis

El valor experimental de la conductividad térmica efectiva del suelo de un intercambiador geotérmico, con independencia de la disposición, que se obtendrá con un ensayo de respuesta térmica basado en teoría de la fuente lineal, fluctuará dentro de rangos de la conductividad térmica de intercambiadores estándar ensayados.

Capítulo II

MARCO CONCEPTUAL

2.1.- Introducción

El diseño de un intercambiador de calor de pozos (BHE), requiere conocer las propiedades térmicas subterráneas del lugar, y de estas propiedades la más importante es la conductividad térmica del subsuelo y es lo que caracteriza al lugar.

La transferencia de energía térmica entre el fluido caloportador que circula por el interior del intercambiador con la pared del pozo dependerá de factores conocidos como el diámetro, tamaño y relleno del pozo, como también del material, la forma del intercambiador y de otros factores desconocidos. Los factores conocidos están en permanente investigación con el objetivo de reducir la resistencia térmica entre el fluido caloportador y la pared del pozo representados por la resistencia térmica del pozo. Desde hace varias décadas atrás, se ha desarrollado un método y se han construido equipos móviles para medir las propiedades térmicas "in situ" del subsuelo.

Este método se conoce como TRT (Test de Respuesta Térmicas), es un método adecuado para determinar la conductividad térmica efectiva del subsuelo y la resistencia térmica del pozo o la conductividad térmica del relleno del pozo, respectivamente (Sanner et al., 2005). De la curva de temperatura del ensayo, se obtiene la conductividad térmica efectiva que caracteriza al lugar.

2.2.- TRT – Ensayo de Respuesta Térmica

El ensayo de respuesta térmica de subsuelo (TRT), nos muestra el cambio de temperatura que ocurre cuando un fluido caloportador circula a través de un intercambiador enterrado en el subsuelo durante un cierto periodo de tiempo. Nos permite estimar las propiedades térmicas del entorno, observando el cambio de temperatura del fluido en función del tiempo. Por ejemplo, una variación rápida de temperatura, nos advierte de un subsuelo de conductividad térmica baja. El ensayo también permite conocer la resistencia térmica del conjunto intercambiador de calor y subsuelo no perturbado, como la diferencia de temperatura entre ambos.

A partir de la curva de temperatura del ensayo, dado por la nube de puntos de los datos de la medición, se obtiene la conductividad térmica efectiva. Las soluciones analíticas de ecuación del calor pueden proporcionar una evaluación del cambio de temperatura del fluido caloportador.

Se puede estimar las características térmicas de un terreno, partiendo de estudios geológicos sobre la constitución del mismo aplicando métodos de laboratorios (Sundberg 1998). Sin embargo, estos métodos no ofrecen información completa de las características del suelo.

La figura 1 nos muestra un equipo móvil similar al construido en la Universidad Técnica de Luleå que mide las propiedades térmicas del terreno para BHE entre 10 y 100 m de profundidad. En este sistema móvil como uno fijo, se necesita hacer consideraciones que permita obtener buenos resultados, como, por ejemplo, conformar correctamente el sistema y minimizar las influencias exteriores.

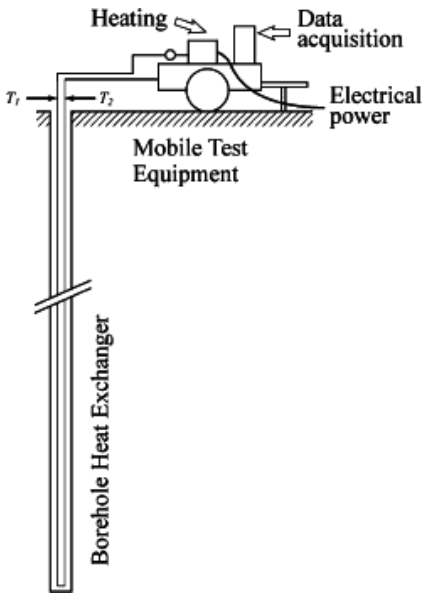

Figura 1- Equipo de prueba para un TRT (Sanner et al. 2005)

Entre las desviaciones más comunes podemos citar, por ejemplo, las fluctuaciones de voltaje la red que dan lugar a fluctuaciones de la potencia inyectada al subsuelo, las influencias climáticas, una mal relleno del pozo, etc.

En la figura 2 se muestran dos curvas de temperatura, donde se observan las influencias climáticas en ambas, en la curva superior la influencia climática es baja ya que no se observan picos pronunciados de temperatura, mientras que en la curva inferior se observan mayores picos de temperatura entonces la influencia climática es alta.

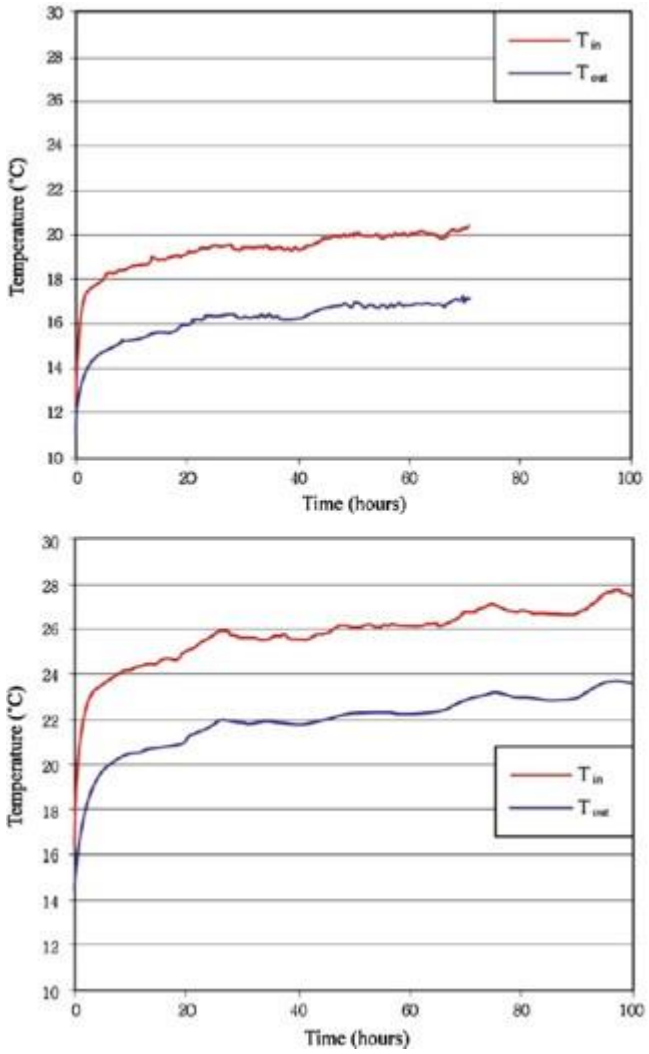

Figura 2 - Curvas de temperatura medida con bajo (arriba) y fuerte (abajo) la influencia del clima. (Sanner et al. 2005)

Respecto a la duración del ensayo hay muchas hipótesis, y sobre todo influenciado por lo comercial ya que exigen ensayos de corta duración. Si el tiempo del ensayo es de 12 horas ya sea por la mañana tarde, tarde noche o noche mañana, su curva representativa de la evolución de temperatura no se podrá evaluar. Si el ensayo dura más de 12 producirá una curva de temperatura más representativa del comportamiento del intercambiador con respecto a los agentes climáticos en ese periodo de tiempo. Analizando la curva de temperatura de la sonda piloto, figura 2, se observa que en las primeras horas el

espectro de temperatura es controlado por el relleno del pozo y no por la configuración del subsuelo circundante, por lo cual se recomienda un mínimo de 48 horas de ensayo, el presente ensayo se realizó siguiendo el método propuesto por la Universidad Técnica de Luleå, el cual es de 72 horas, y con un criterio de tiempo mínimo dado por la siguiente ecuación:

$$t_b = \frac{5r^2}{\alpha} \qquad (1)$$

Donde, t_b: tiempo mínimo de datos a ser utilizado, r_0: radio de la perforación, α: difusividad térmica

Con los datos del ensayo se determinó el coeficiente de conductividad efectivo de subsuelo, para ello se aplicó la técnica de determinación de la pendiente.

2.3.- Técnica de determinación de pendiente

Este método es simple y preciso. Se basa en la solución del problema LSM (modelo de fuente de línea infinita).

La primera aproximación para calcular el transporte térmico alrededor de una tubería de intercambio de calor en el suelo es la teoría de la línea de Kelvin que asume la fuente de línea infinita, en ella el suelo se considera como un medio infinito con una temperatura uniforme inicial. Ósea al pozo lo se supone como una fuente de línea infinita, la transferencia de calor en la dirección del eje del pozo, incluyendo el flujo de calor a través de la superficie del suelo y abajo del fondo del pozo, no se tiene en cuenta. El proceso de conducción de calor en el suelo puede ser, por lo tanto, simplificado como unidimensional.

Estos procesos fueron estudiados principalmente por Ingersoll, Carlslaw y Jaeger, y varios investigadores. Ingersoll et al. (1954) desarrollaron el modelo de línea-fuente, asumiendo que el pozo como fuente de línea es infinitamente largo y el flujo de calor es normal a la fuente de línea con un flujo constante. Este es el modelo básico utilizado para calcular la transferencia de calor entre la fuente de la línea y el suelo, y muchos otros modelos desarrollados por otros investigadores se basan básicamente en el modelo de línea-fuente. Si la fuente de la línea comienza a tiempo cero y el medio se encuentra a una temperatura inicialmente uniforme, la expresión dada por Ingersoll para la temperatura en cualquier momento t en cualquier punto se puede escribir como:

$$T - T_o = \frac{Q'}{2\pi k}\int_X^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta}\, d\beta \sim \frac{Q'}{2\pi k} I(X)$$

$Donde$:

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha(t-t')}} X$$

$$X = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}$$

Al aplicar este modelo de línea-fuente, Ingersoll et al. (1954) estudió el sistema de intercambiadores de calor de tierra con bombas de calor, y se informó que en general, el acuerdo de la teoría y el experimento era aceptable.

Carlslaw y Jaeger (1959), el campo de temperatura en el suelo se puede escribir como función según el tiempo (t) y el radio (r) alrededor de una fuente de línea con una tasa de inyección de calor constante (q) desde una línea a lo largo del eje vertical del pozo en un sólido infinito,

desarrollando la siguiente expresión:

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda}\int_{r^2/_{4\alpha t}}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left[\frac{r^2}{4\alpha t}\right]$$

Mogensen (1983) fue el primero que aplicó este método para determinar la conductividad térmica del suelo in situ y la resistencia térmica del pozo. Se basa en la extracción de flujo de calor constante (o frío) por medio de un fluido caloportador que circula a través de un sistema BHE. Los datos de temperatura del fluido de entrada y salida del BHE se miden y registran. El proceso de transferencia de calor se describe mediante un modelo matemático y esto se compara con los datos de campo experimentales de la temperatura a lo largo del tiempo. En el modelo matemático, los valores de la conductividad térmica del suelo y la resistencia térmica del pozo deben ser asumidos. Aunque TRT convencional no es un sistema preciso, se ha aplicado ampliamente para determinar el diseño óptimo BHE.

Eklöf y Gehlin (1996); Gehlin y Nordell (1997), construyeron un aparato móvil de prueba de respuesta térmica, TED, que se desarrolló en la Universidad de Tecnología de Luleå, Suecia, para determinar la conductividad térmica del suelo. El equipo consta de una bomba, un calentador, sensores de temperatura para medir las temperaturas de entrada y salida del pozo. Se instala en un pequeño remolque y es fácilmente transportable. La prueba es completamente automática, incluido el registro de datos medidos y tarda de 4 a 5 días en ejecutarse. Los resultados se evalúan fácilmente a partir de los datos, graficando la temperatura media del fluido caloportador versus tiempo.

2.4.- Modelo matemático

El ensayo de respuesta térmica se realiza en un pozo individual con una tasa de inyección constante, por lo cual no se tiene en cuenta, cómo afectan los pozos cercanos y que la inyección de energía térmica que reciben es fluctuante.

Se denomina gradiente geotérmico al aumento de temperatura del suelo con el aumento de profundidad. El campo de temperatura que en condiciones normales existe por debajo de la superficie del suelo se lo considera estacionario, cuando el gradiente geotérmico no varía con el tiempo ni con los cambios de temperatura estacionales que afectan la superficie del terreno, esta no variación de la temperatura se produce a una profundidad de 10 a 15 metros. Ahora bien, cuando se inyecta calor en un pozo de sondeo, el campo de temperatura comienza a variar y cuanto más calor se inyecta, más caliente se vuelve el subsuelo, por lo cual la temperatura de subsuelo no perturbado se encontrará a una distancia mayor del pozo. Si el calor inyectado es constante, el campo de temperatura será nuevamente estacionario, pero tardará como mínimo de 20 a 25 años. En esta situación, se genera un proceso térmico que puede analizarse en tres estadios. Primer estadio, proceso transitorio, cuando se registra un aumento de la temperatura del suelo. Segundo estadio, proceso estacionario, cuando ya no se registra el aumento de temperatura y la velocidad de transferencia de calor del subsuelo al medio ambiente se iguala a la velocidad de inyección de calor en el subsuelo. Tercer estadio, pulso, cuando se produce una variación del calor de inyección y se superpone al proceso estacionario.

La ecuación fundamental de conducción del calor nos muestra que la variación de la temperatura depende de la difusividad ‘α’.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2)$$

Entonces la temperatura T, en un punto de coordenadas (x,y,z), está determinada por el tiempo 't', y la difusividad 'á'.

Durante el proceso transitorio se tiene:

$$T_r(t) = T_{sur} + T_{rq}(t) \qquad (3)$$

Durante el proceso de un pulso

$$T_r(t) = T_r + T_{rq}(t) \qquad (4)$$

Donde, Tr(t): temperatura en el tiempo "t", Tr: temperatura estacionaria originada por la temperatura media del fluido inyectado, Tsur: temperatura de suelo no perturbado, Trq(t): cambio de temperatura debido a la desviación de la temperatura media del fluido.

Acá se tendrá en cuenta solo el proceso transitorio, por lo que la superposición del pulso no es una variable para el ensayo de respuesta térmica, ya que una de las condiciones del mismo es que la fuente de energía debe proveer potencia constante durante su realización.

La ecuación fundamental de transferencia de calor se satisface por:

$$T = T_q(r,t) = \frac{q}{8(\pi\lambda t)^{3/2}} e^{-r^2/4\alpha t} \qquad (5)$$

Donde, α = λ / C difusividad térmica, T(r,t): es la temperatura en el punto (x,y,z), $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$

El punto de origen posee una potencia 'q', en el tiempo t=0, y se encuentra en la posición (x',y',z') y la temperatura de inicio es de 0ºC. Una perforación no se la puede aproximar a una fuente puntual, pero si a una fuente de línea.

Integrando la ecuación 5, se obtiene la ecuación para la fuente de línea, que expresa la variación de la temperatura en función del tiempo t y a una distancia radial "r" de coordenadas (x,y)

$$T_q(r,t) = \frac{q}{8(\pi\lambda t)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} dz'\, e^{-r^2/4\lambda t}$$

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda t} e^{-\left[(x-x')^2+(y-y')^2\right]/4\lambda t} \qquad (6)$$

Donde la fuente de línea pasa por el punto (x',y') y paralela al eje z. De la ecuación 6 podemos obtener la expresión de una fuente de línea continua. Si se inyecta una potencia térmica Φ(t'), a partir de t=0 y con la temperatura de la roca iguala cero, entonces en un tiempo 't' la temperatura deberá ser:

$$T_q(r,t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_0^t \Phi(t')\, e^{-r^2/4\alpha(t-t')} \frac{dt'}{t-t'} \qquad (7)$$

Como, Φ(t') = q, y es constante entonces tenemos:

$$\mathrm{T_q(r,t)} = \frac{\mathrm{q}}{4\pi\lambda} \int_{\mathrm{r^2/4\alpha t}}^{\infty} \frac{1}{\mathrm{s}} \mathrm{e^{-s}ds} = \frac{\mathrm{q}}{4\pi\lambda} \mathrm{E_1}\left[\frac{\mathrm{r^2}}{4\alpha\mathrm{t}}\right] \qquad (8)$$

Dónde,

$$E_1(r^2/4\alpha t) = \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds$$

Esta solución puede ser de dos diferentes formas, y depende de lo que se

necesita. Aquí nos interesan los cambios de temperatura con el tiempo y a una cierta distancia radial "r" desde la fuente de línea, se obtiene:

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_t\left[\frac{\alpha t}{r^2}\right] - \tag{9}$$

$$E_t(\tau) = E_1\left[\frac{1}{4\tau}\right] = \int_{1/4\tau}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds$$

$$\tau = \frac{\alpha t}{r^2}$$

La función $E_t(\tau)$ nos da el cambio de temperatura con el tiempo a la distancia radial 'r' del centro del pozo.

Para $\tau \geq 0{,}5$ la siguiente ecuación es válida con un error máximo del 2 %.

$$E_t(\tau) \approx G_t(\tau) = ln(4\tau) - \gamma - \frac{1}{4}\left[\frac{1}{\tau} - \left[\frac{1}{\tau} - \frac{1}{16\tau^2}\right]\right] \tag{10}$$

Donde, γ= 0,5772 (Const. de EULER)

La figura 3 representa las dos funciones, G_t, y ln (4t) – γ, respecto τ. Donde se observa que la función [G_t], se puede aproximar a la función [ln (4t) – γ].

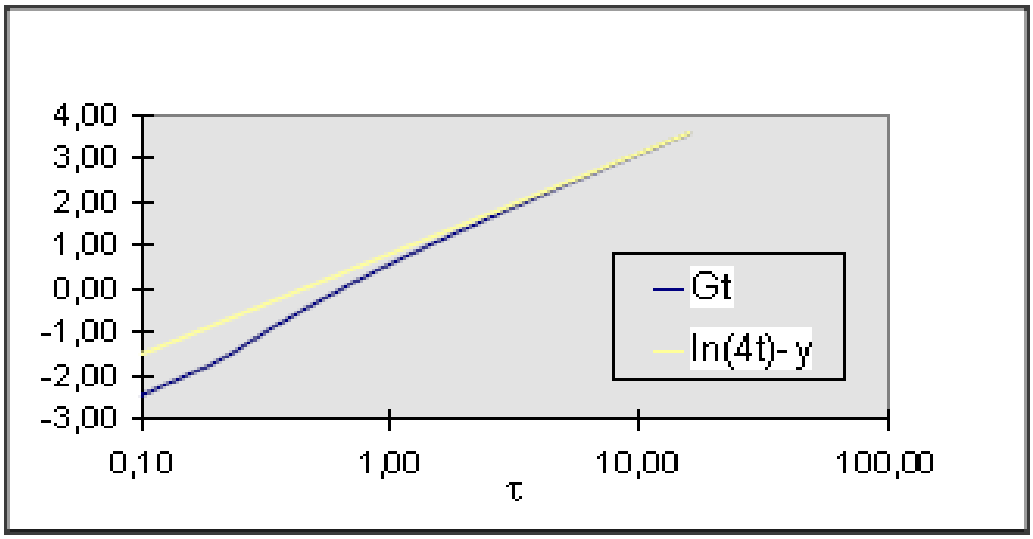

Figura 3.- Representa de las funciones E,G, y sus aproximaciones, en f(τ)

Para $\tau \geq 5$, se realiza otra simplificación

$$E_t\left[\frac{\alpha t}{r^2}\right] \approx ln\left[\frac{4\alpha t}{r^2}\right] - \gamma \tag{11}$$

Se puede escribir:

$$E_t(\tau) \approx ln(4t) - \gamma \tag{12}$$

La ecuación 9, que la volvemos a escribir

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} E_t\left[\frac{\alpha t}{r^2}\right]$$

Ahora con un error máximo del 2 %

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r^2}\right] - \gamma\right]$$

Reemplazando:

$$q = \frac{Q}{H}$$

Nos queda que

$$T_q(r,t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r^2}\right] - \gamma\right] \tag{13}$$

Después de esta manipulación, la solución del problema puede escribirse de forma simplificada. Cuando el argumento es mayor que cinco, la diferencia entre la expresión original y la simplificada es menor al 2%.

Entonces de la figura 3 donde:

$$\tau = \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5$$

Por lo tanto, el criterio del tiempo será:

$$t \geq \frac{5r^2}{\alpha}$$

Aquellos valores que no cumplan con este criterio de tiempo, en la ecuación (13), son valores erróneos.

Ahora bien, lo que nos interesa es la temperatura en la pared del pozo, o sea cuando

$$r = r_0$$

Dónde: r_0 es el radio desde el centro del pozo hasta la pared del mismo.

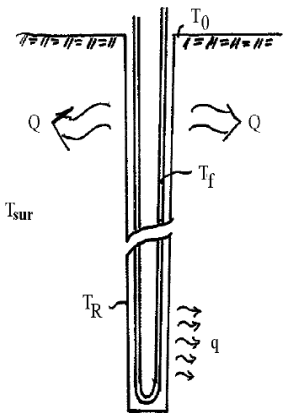

Figura 4.- Esquema de una sonda geotérmica vertical

Si se inyecta energía térmica:

$$T_q(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r^2}\right] - \gamma\right] \tag{14}$$

Si se extrae energía térmica:

$$T_{rq}(t) = -\frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]$$

Las dos ecuaciones anteriores se considera el criterio de tiempo:

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

Si ahora insertamos la ecuación 14 en la ecuación 3, y reescribiendo ambas:

$$T_q(r,t) = T_{rq}(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]$$

$$T_r(t) = T_{sur} + T_{rq}(t)$$

$$T_q(r,t) = T_{rq}(t)$$

$$r = r_0 = cte$$

Reemplazando:

$$T_{r_0}(t) = T_{sur} + \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] \tag{15}$$

Con el criterio del tiempo:

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

La ecuacion15 da la relación entre la temperatura del suelo no perturbado T_{sur}, y la temperatura de la pared del pozo $T_{r0}(t)$.

La relación entre la temperatura del suelo no perturbado, T_{sur}, y la temperatura del fluido caloportador T_f., se establece por una resistencia térmica denominada R_b [ºK (W / m)], y es la resistencia entre el fluido caloportador y la pared del pozo.

2.5.- Resistencia térmica

Se define la resistencia térmica para una inyección de energía térmica como:

$$T_f\,(t) - T_{r_0}(t) = R_b q \tag{16}$$

Dónde, T_f (t): Temperatura media del fluido portador de energía térmica ($T_{entrada}$ + T_{salida}) / 2.

Reemplazando la solución aproximada, ecuación 15 en la 16,

$$T_f\,(t) - \left\{T_{sur} + \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]\right\} = R_b q$$

$$T_f\,(t) - T_{sur} - \left\{\frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]\right\} = R_b q$$

$$T_f(t) - R_b q - T_{sur} = \left\{\frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]\right\} \tag{17}$$

Por lo cual la temperatura del fluido portador de energía térmica, durante el proceso transitorio T_f (t) será:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur} \tag{18}$$

Esta ecuación relaciona la temperatura del fluido caloportador Tf(t) con la temperatura de suelo no perturbado Tsur. Esta relación introduce una nueva variable que se denomina "R_b", que expresa la resistencia que hay entre el fluido caloportador y la pared del pozo, dada por la siguiente expresión:

$$R_b = \left(T_f(t) - T_{sur}\right)\frac{Q}{H} - \frac{1}{4\pi\lambda}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] \tag{19}$$

2.6.- El proceso estacionario

La relación entre la temperatura de suelo no perturbada y la temperatura de la pared del pozo, se realiza teniendo en cuentas algunas consideraciones y además vamos a suponemos que el radio r_0 del pozo y su diámetro D_i, son pequeños con relación a la profundidad del pozo H.

$$T_{r_0}(t) = T_{sur} + \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right]$$

$$\mathrm{Q} = \frac{2\pi\lambda\mathrm{H}\left(T_{r_0}(t) - \mathrm{T_{sur}}\right)}{\ln\left[\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{r_0}\sqrt{1.5}}\right] - \frac{1}{2\left(1 + 2\frac{\mathrm{D_i}}{\mathrm{H}}\right)}} \tag{20}$$

Simplificando:

$$Q = \frac{2\pi\lambda H\left(T_{r_0}(t) - T_{sur}\right)}{ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] - 0.01 + \frac{D_i}{H}}$$

Acomodando:

$$Q = \frac{2\pi\lambda H\left(T_{r_0}(t) - T_{sur}\right)}{ln\left[\frac{H}{2r_0}\right]} \tag{21}$$

Estas ecuaciones poseen un error. Pero ellas son fundamentales

pues nos dan la cantidad de energía térmica que pueden inyectarse anualmente cuando tenemos una diferencia de temperatura de:

$$T_{r0}\ (t) - T_{sur}$$

Donde, $Tr_0\ (t)$: $es\ la\ temperatura\ de\ la\ roca\ en\ la\ pared\ del\ pozo$

Despejando de la ecuación 21, se obtiene:

$$T_{r_0}(t) - T_{sur} = \frac{Q}{2\pi\lambda H} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right]$$

$$T_{r_0}(t) = \frac{Q}{2\pi\lambda H} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] + T_{sur} \qquad (22)$$

Reemplazando, la ecuación 22 en la ecuación 16

$$T_f\ (t) - T_{r0}\ (t) = R_b q$$

$$T_f\ (t) - T_{sur} = \frac{Q}{2\pi\lambda H} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] + R_b \frac{Q}{H}$$

Por lo cual la temperatura del fluido caloportador, durante el proceso estacionario T_f (t) será:

$$T_f\ (t) - T_{sur} = \frac{Q}{H}\left[\frac{1}{2\pi\lambda} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] + R_b\right] \qquad (23)$$

El intervalo de tiempo t_s entre las condiciones transitorias y las estacionarias surgen de igualar la ecuación 18, transitoria, con la ecuación 23, estacionaria, volviendo a escribir ambas:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur}$$

$$T_f(t) - T_{sur} = \frac{Q}{H}\left[\frac{1}{2\pi\lambda} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] + R_b\right]$$

Se obtiene

$$\frac{16\alpha t}{H^2} - e^{\gamma} = 0$$

Por lo cual se obtiene:

$$t = t_s = \frac{e^{\gamma} * H^2}{16\alpha}[seg] \tag{24}$$

Donde,

$$e^{\gamma} = 1{,}781$$

El intervalo de tiempo entre el proceso transitorio y el estacionario "t_s".

$$t = t_s = \frac{H^2}{9\alpha}[seg] \tag{25}$$

2.7.- Resumen de las ecuaciones

Cuando a un pozo de sondeo se le inyecta energía térmica, comienza un proceso transitorio. La relación entre los distintos parámetros de este proceso está descripta por la ecuación 18, rescrita:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur}$$

Con un criterio de tiempo dado por:

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

Un determinado tiempo, después dado por:

$$t_s = \frac{H^2}{9\alpha}[seg]$$

El cual es de varias décadas, culmina el proceso transitorio y comienza un proceso estacionario, el cual esta descripto por la ecuación 23, rescrita:

$$T_f(t) - T_{sur} = \frac{Q}{H}\left[\frac{1}{2\pi\lambda} ln\left[\frac{H}{2r_0}\right] + R_b\right]$$

2.8.- Método de la pendiente

La ecuación 18, que reescribiremos aquí, se coloca luego de manipulaciones algebraicas como:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur}$$

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha}{r_0^2}\right] + \ln t - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur}$$

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur} + \frac{Q}{4\pi\lambda H}\ln t$$

Que en términos del logaritmo de t puede interpretarse como una recta. Si el flujo de energía térmica Q es constante tenemos una ecuación que responde a la ecuación de una recta.

Ecuación de la recta:

$$y = b + kx$$

Donde, x,y: son variables en un plano cartesiano, k: pendiente de la recta y está relacionada con la inclinación que toma la recta respecto a un par de ejes que definen el plano, b: es el termino independiente u ordenada de origen y es el valor del punto en el cual la recta corta al eje vertical en el plano.

$$T_f(t) = b + k\ln t \tag{26}$$

$$b = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\left[ln\left[\frac{4\alpha}{r_0^2}\right] - \gamma\right] + \frac{QR_b}{H} + T_{sur} \quad (27)$$

$$kx = \frac{Q}{4\pi\lambda H}\ln t \quad (28)$$

Obtenida la pendiente k del ensayo se puede calcular la conductividad efectiva del suelo con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{Q/H}{4\pi m} \quad (29)$$

Donde, H: Representa el largo de la perforación o la longitud efectiva del intercambiador en (m). Q: Representa la potencia promedio de calor inyectado. q = Q/H: Velocidad de inyección de calor por unidad de longitud de la perforación.

En este modelo, para reducir los errores de las simplificaciones realizadas, existe un tiempo mínimo de medición, lo cual se denomina criterio de tiempo.

Este criterio de tiempo viene dado por:

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

En general, existe un límite físico para la mínima duración del test, el cual permite registrar un flujo estable de calor en el suelo. En las primeras horas el desarrollo de la temperatura está principalmente controlado por el relleno de la perforación y no por el suelo que lo rodea. Eklöf y Gehlin, también entregan un criterio para el tiempo mínimo:

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

Donde tb representa el tiempo límite inferior de datos a ser usados.

2.9.- Temperatura de suelo no perturbado

En el modelo matemático requiere como dato la temperatura de suelo no perturbado, para poder diseñar correctamente un intercambiador de energía térmica de suelo.

El gradiente geotérmico la temperatura no perturbada del suelo aumenta con la profundidad, por lo cual este fenómeno no puede dejarse de lado. El mismo es variable en las distintas partes del mundo, y esta variación es de 0,5 a 3 K cada 100metros.

Por otro lado, la variación de temperatura del aire debido al cambio de las estaciones provoca una variación de la temperatura del suelo que afecta hasta unos 15 metros debajo de la superficie. (Ericsson et. al. (1985), Sanner et. al. (1986).

Esta variación de temperatura de las estaciones no llega por debajo de los 15 m de la superficie de la tierra. Ericsson et. al. (1985)

Eskinson et. al. (1987) demuestra que para este tipo de aplicaciones no es necesario determinar las variaciones de temperatura a lo largo del pozo de sondeo.

La figura 5 muestra el perfil de temperatura típico de suelo, donde se observa las fluctuaciones estacionales hasta los 15 m.

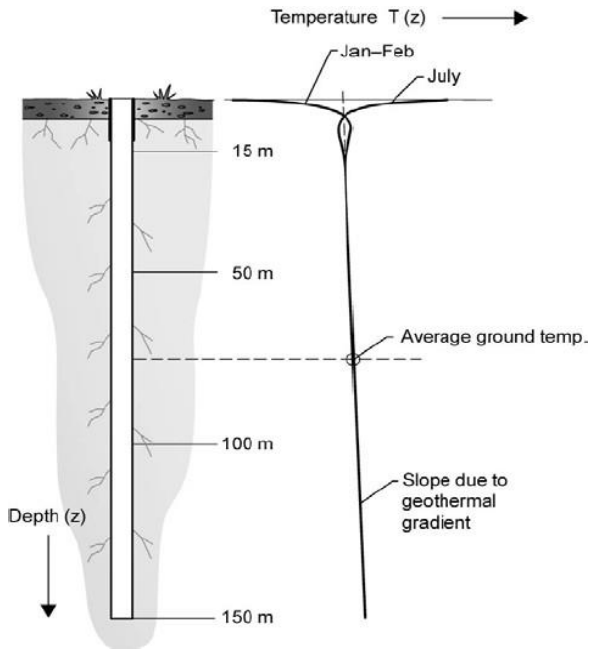

Figura 5 - Perfil de temperatura de suelo

La temperatura media a lo largo de un pozo es una buena aproximación de la temperatura homogénea de un terreno no perturbado, cuando medimos la temperatura de suelo no perturbado el pozo debe estar en equilibrio térmico con el suelo circundante. Para determinar la temperatura del pozo se lo puede hacer por uno de los siguientes métodos.

1.- Midiendo la temperatura del agua que llena el tubo, sin ningún tipo de perturbación, suponiendo que esta medición da el perfil correcto de temperatura del suelo no perturbado. Para determinar la temperatura media del pozo esto se realizaría midiendo la temperatura cada poco metro a lo largo del tubo y realizando la media de las mismas.

2.- Un perfil de temperatura similar al anterior se puede determinar a partir de una base de datos de temperatura del fluido caloportador que circula por el intercambiador, durante un intervalo de tiempo no muy grande.

Este método consiste en hacer circular el líquido caloportador a través del intercambiador enterado aproximadamente media hora antes de comenzar con la perturbación de la resistencia. Teniendo en cuenta que habrá un pequeño calentamiento del fluido debido al trabajo de la bomba de circulación.

3.- Kavanaugh et. al. (2000), en su criterio dice que luego de la activación de la bomba de circulación y tomando los registros de temperatura durante un intervalo de tiempo. Una buena estimación de la temperatura de suelo inicial es la temperatura mínima del registro.

Capítulo III

MATERIALES y MÉTODOS

3.1.- Generalidades

En la elaboración del Trabajo Final de esta tesis se siguió un enfoque metodológico de tipo cuantitativo de carácter exploratorio-descriptivo, basados a partir de los siguientes ítems

1. Instalación de un intercambiador geotérmico horizontal.

2. Colocación de los instrumentos de medición, para obtención de las distintas temperaturas.

3. Realización del TRT, que consiste en una inyección de energía en el suelo a través del intercambiador geotérmico y adquisición de los datos.

4. Análisis de los datos obtenidos y cálculo de la conductividad térmica efectiva.

El ensayo fue realizado a partir del método propuesto en el trabajo de tesis realizada por Catarina Eklöf and Signhild Gehlin from the Tekniska Högskolan Luleå Luleå University of Technology.

Utilizado el modelo matemático de intercambiadores verticales, basados en la fuente de línea infinita de Kelvin.

3.2.- El banco ensayo

En este apartado se describirá la experiencia respecto al banco de ensayo que se construyó y donde se llevó a cabo el ensayo de respuesta térmica de suelo "in situ". Este banco se realizó en la provincia de San Luis, Ciudad Capital, en la República Argentina.

El ensayo consiste en hacer circular un fluido caloportador de energía térmica, normalmente agua, por una tubería en un circuito cerrado a modo de intercambiador de energía, instalado en un pozo.

Este fluido se hace circular con una velocidad tal que el flujo resulte turbulento. Se registra el caudal que circula.

El fluido que circula por el intercambiador se calienta mediante una resistencia eléctrica o en un calefactor a combustible, de potencia constante.

3.3.- Realización del banco de ensayo

El mismo consistió en utilizar una excavación ya realizada para una piscina, de 4,50 m de largo por 2,30 m de ancho y 1,5 m de profundidad, en la cual ya se había practicado un contra piso de cemento de 7,5 cm de espesor, sobre el mismo se extendió el intercambiador geotérmico.

El intercambiador geotérmico consiste en un caño PEBD Φ ¾ de pulgada K6 apto para conducciones de agua. Con esta tubería se dibujó un serpentín sobre una malla sima a la cual se lo sujeto. El conjunto malla - serpentín se colocó sobre el contra piso de cemento ya realizado, se rellenó con otra capa de hormigón de 7,5 cm de espesor. Se dejaron los extremos de la tubería libre. El intercambiador geotérmico quedo entre un bloque de cemento de 15 cm de hormigón sin ningún tipo de aditivo como la bentonita.

Esquema del dispositivo montado en la provincia de San Luís

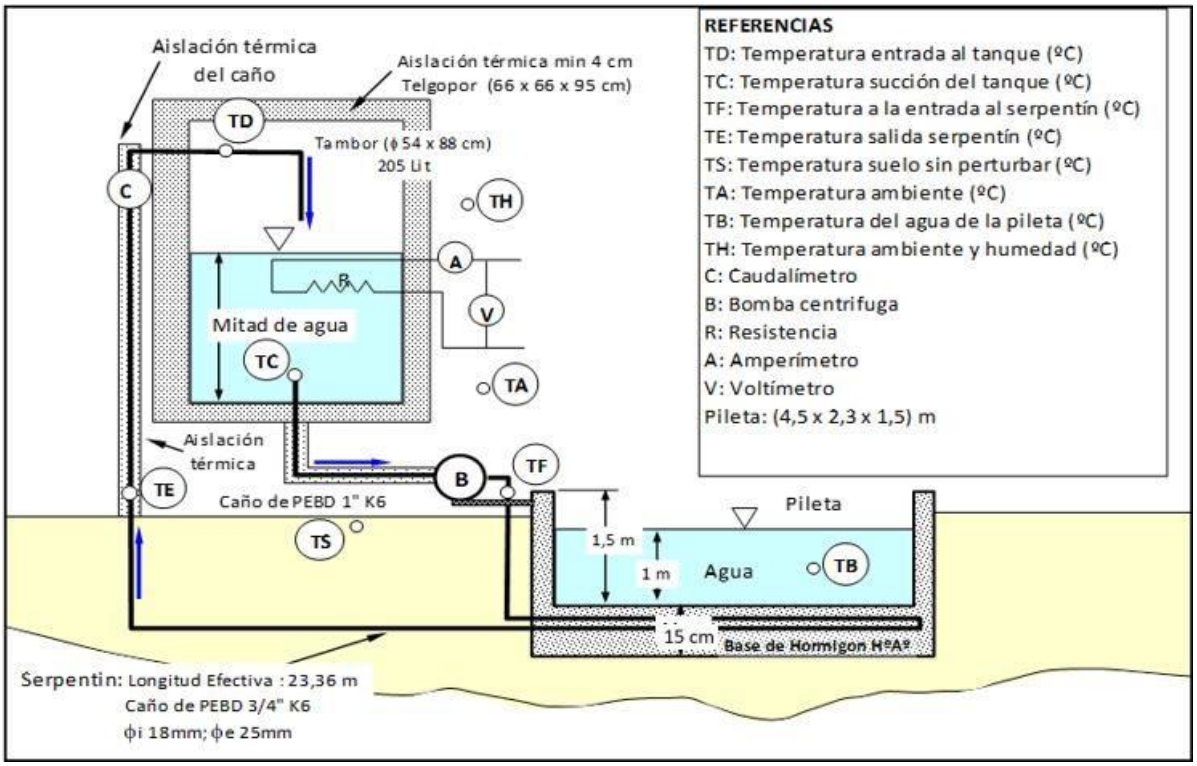

Figura 6.- Esquema del dispositivo montado en la Provincia de San Luis, en la República Argentina.

El tanque de expansión se construyó con un tambor industrial de plástico de aproximadamente 54 cm de diámetro por 88 cm de alto, con una capacidad de aproximadamente 205 litros, se le extrajo la tapa superior y se hicieron las perforaciones para las conexiones de entrada y salida del fluido caloportador. Posteriormente se lo aisló térmicamente, para lo que se procedió a realizar una caja de telgopor de alta densidad y el espacio entre el tanque cilíndrico y la caja se rellenó con perlitas de telgopor.

A la aislación térmica se le practicaron dos orificios para el ingreso y egreso del fluido caloportador. También se construyó de telgopor la tapa del tambor y de la caja de aislación térmica.

Después de concluido el armado del tanque de expansión, se procedió a colocar los instrumentos de medición. Para ello se perforó el intercambiador a una distancia de 10 cm de su ingreso y egreso del suelo, se colocó el primero y segundo termómetro. Posteriormente se colocó el tercero y cuarto termómetro en el tanque de expansión, uno a la salida y el otro a la entrada del fluido caloportador.

Se midió la temperatura de suelo no perturbado y para ello se utilizó un termómetro apto para las mediciones de temperatura de suelo, también se colocó un termómetro para medir la temperatura de agua de la pileta, además un termómetro e higrómetro, para medir temperatura y humedad ambiente.

En la salida del intercambiador y antes del ingreso al tanque de expansión, se colocó un caudalímetro mecánico, para completar se colocó un amperímetro y voltímetro para registrar el consumo de potencia de la resistencia perturbadora y de la bomba de circulación

El banco de ensayo se completó con la instalación de una bomba de circulación entre la salida del tanque de expansión y el inicio del intercambiador geotérmico, se procedió luego a aislar toda la cañería de comunicación con el tanque.

El calentamiento del fluido caloportador se realizó con una resistencia eléctrica de inmersión en el tanque de expansión con su respectiva conexión.

Se tomaron los registros de los siguientes instrumentos:

1.- Temperatura de entrada al intercambiador geotérmico

2.- Temperatura de salida del intercambiador geotérmico

3.- Temperatura al ingreso del tambor de expansión

4.- Temperatura a la salida del tambor de expansión

5.- Temperatura del agua de la pileta

6.- Temperatura del suelo no perturbado

7.- Temperatura ambiente

8.- Humedad relativa

10.- Caudal

11.- Tensión en la bomba de circulación

12.- Tensión en la resistencia perturbadora

13.- Corriente en la bomba de circulación

14.- Corriente en la resistencia perturbadora

Estos registros se realizaron en forma artesanal y los mismos fueron tomados cada 10 minutos. Luego se volcaron en una planilla de cálculo y a partir de allí se obtuvo el valor del coeficiente de conductividad térmica y la resistencia convectiva entre el fluido caloportador y la pared del pozo.

La prueba de recuperación térmica consiste en que una vez desconectada la resistencia eléctrica se continúa haciendo circular el fluido caloportador hasta que vuelve a su condición de original, contando solo con una pequeña contribución de energía dada por la bomba de circulación.

Se realizó un contraste de los termómetros, con el objeto de determinar las desviaciones entre ellos, ya que los mismos son comerciales, los datos obtenidos se exponen en la tabla 1 y solo a título informativo.

hora	Termómetro TA (ºC)	Termómetro TB (ºC)	Termómetro TC (ºC)	Termómetro TD (ºC)	Termómetro TE (ºC)	Termómetro TF (ºC)	Termómetro TH (ºC)	Humedad (%)
10:00	23,7	23,6	23.6	23.2	23,7	23.3	24	43%

Tabla 1.- Contraste de los termómetros

La tabla 2, se expone un resumen de los datos de la instalación.

Constante	**Valor**
L: Longitud efectiva del intercambiador (m)	23,36
Difusividad Térmica (Hormigón) α (m^2/seg)	$0,91*10^{-6}$
r: Radio sistema (m)	0,075
Constante de Euler	0,5772
N° Reynolds, turbulento > 3200	36.658

Tabla 2.- Datos de la instalación

3.4.- Ensayos

El intercambiador propuesto en este trabajo se lo ensayo dos veces, y en este apartado se describirá a ambos.

Primer ensayo

Pre ensayo sin perturbación

Se comenzó con el pre ensayo sin perturbación, accionando solo la bomba de circulación, para cargar el intercambiador geotérmico, con agua proveniente del tanque de expansión y se observó el funcionamiento del sistema, con el objeto de establecer pérdidas u otras posibles fallas. El mismo fue llevado a cabo el día 30/03/2012 a la hora 19:52, se culminó a las 20:15 hs. Se procedió a realizar las correcciones pertinentes, como eliminar fugas en la tubería de impulsión, acomodar los cables de alimentación del calentador eléctrico, etc.

Se confeccionó la tabla 3 de datos

Caudal (m^3/min)	TA: Temp. Amb. 1	TB: Temp. agua pileta	TC: Temp. salida tanque	TD: Temp. entrada tanque	TE: Temp. salida intercamb.	TF: Temp. entrada intercamb.	TH: Temp. Amb. 2
0,055	23,8	19,1	22,6	20,5	24	24,4	23

Tabla 3.- Valores de temperatura de todo el sistema montado, al comienzo de la carga y circulación del fluido por todo el circuito hidráulico

Donde:

T_A: Temperatura ambiente 1

T_B: Temperatura de agua en la pileta

T_C: Temperatura salida tanque de expansión

T_D: Temperatura entrada tanque de expansión

T_E: Temperatura salida del intercambiador

T_F: Temperatura entrada del intercambiador

T_H: Temperatura ambiente 2

El día 30/03/2012 a la hora 21:18, se comenzó con el segundo pre ensayo, con toma de datos aislados, hasta la hora 02:00, del día 31/03/2012, en la cual se le agrega al agua del tanque 2 litros de glicol.

Se confeccionó la tabla de datos siguiente a las 21:18 hs.

Caudal (m3/min)	TA: Temp. Amb. 1	TB: Temp. agua pileta	TC: Temp. salida tanque	TD: Temp. entrada tanque	TE: Temp. salida intercamb.	TF: Temp. entrada intercamb.	TH: Temp. Amb. 2
1,023	21,9	19,3	21,6	21,0	22	22,6	21

Tabla 4.-Datos del segundo pre ensayo

A la hora 02:00 del día 31/03/2012 se agrega al agua contenida en el tanque de expansión 2 litros de glicol.

Se confeccionó la tabla de datos siguiente a las 02:00 hs.

Caudal (m3/min)	TA: Temp. Amb. 1	TB: Temp. agua pileta	TC: Temp. salida tanque	TD: Temp. entrada tanque	TE: Temp. salida intercamb.	TF: Temp. entrada intercamb.	TH: Temp. Amb. 2
5,79	19,4	19,1	22,5	22,0	22,3	22,7	19

Tabla 5.-Datos del segundo pre-ensayo, con glicol

Determinación de la temperatura de suelo no perturbado

Para determinar la temperatura de suelo no perturbado, T_{sur}, se realizó el promedio de los datos de las temperaturas obtenidas a la salida del intercambiador geotérmico, sin la perturbación, solo con la circulación del fluido portador de energía térmica. Este promedio dio T_{sur}, 22,25 ºC.

Realización del primer ensayo con perturbación

El día 01/04/2012 a las 13:06 se comenzó a realizar el test de respuesta térmica, con la perturbación. El objetivo del mismo es generar un reporte durante 72 horas, incluidos los imprevistos. Con la base de datos de temperatura, se determinará el coeficiente de conductividad térmica y la resistencia térmica de suelo.

En la figura 7 se graficó la temperatura en función del logaritmo natural del tiempo, obteniendo la curva de evolución. Luego se procedió a realizar la regresión lineal con su ecuación característica y el error medio cuadrático. Con los datos obtenidos de las mediciones de temperatura a la entrada y salida del intercambiador geotérmico, se realizó la media de ambas temperaturas.

$$T_f = \frac{T_{entrada\ col.} + T_{salida\ sal.}}{2}$$

$$T_f = \frac{T_F + T_E}{2}$$

Figura 7- Evolución de la temperatura media del fluido en el intercambiador geotérmico.

Aplicación del criterio del tiempo

Ahora se necesita conocer el tiempo a partir del cual se evalúa la evolución de la temperatura media del fluido en función del logaritmo natural del tiempo en horas.

Este tiempo está dado por:

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

Donde, α: Difusividad térmica del hormigón: $\alpha = 0{,}91*10^{-6}$ m^2/seg. r_0 = 0,075 m distancia radial del centro del tubo portador de fluido al borde de la pared hormigón.

El tiempo valido para la evaluación de la pendiente es:

$$t = \frac{5*0{,}075^2}{0{,}91*10^{-6}} = 30907\text{seg, aproximado 9 hs.}$$

En la figura 8 se muestra la curva obtenida de la temperatura media del fluido respecto al logaritmo natural del tiempo, a partir de 9 horas después de iniciado el ensayo, como también su regresión lineal. La curva

que se obtuvo desde el inicio hasta las 9 horas se desprecia, por la aproximación de las funciones.

Cálculo del coeficiente de conductividad térmica con criterio de tiempo

En la figura 8 se muestra la experiencia, 9 horas luego de iniciado el ensayo, hasta 73 horas en que finalizó. Luego se obtuvo la recta de regresión lineal, su ecuación y el error medio cuadrático.

Figura 8- Temperatura media del fluido con criterio de tiempo

Se observa que el error medio cuadrático es grande, por lo que se supone que fue por influencia climática ya que durante la realización del ensayo hubo horas de lluvia que dificultó la toma de datos.

Más allá de esto, se exponen son los resultados obtenidos experimentalmente y de forma manual.

Con los datos del ensayo se hizo una regresión lineal y de ella se obtuvo la conductividad efectiva.

$$y = 1{,}7231x + 31{,}861$$

La pendiente de la función experimental linealizada, k, representa

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$$

Como k es conocido, se puede calcular el valor de la conductividad efectiva como:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H}$$

Para este ensayo se obtuvo λ_{eff} = 1.63 W/mK, con Q=822,41 W, H= 23.36m. y k=1,72

Determinación de r_b resistencia térmica

La figura 9 muestra la evolución de R_b en función del logaritmo natural del tiempo.

Figura 9 - Evolución de R_b en función del tiempo total.

El valor promedio de R_b con el criterio de tiempo de 9 horas resulto ser:

$$R_b = 0.257\ [{}^{K}/_{(W/m)}]$$

La tabla 6, muestra los datos con los cuales se realizó el ensayo.

Datos del ensayo	Valor
Q: Potencia inyectada (W)	822,41
q =Q/L Potencia por unidad de longitud de la tubería (W//m)	35,21
T_{sur}: Temperatura suelo no perturbado (ºC)	22,25
t: Tiempo del ensayo con perturbación (Hs)	73,333
L: Longitud efectiva del intercambiador (m)	23,36

Tabla 6.- Datos del primer ensayo

La tabla 7, muestra el resumen de los resultados obtenidos del primer ensayo.

Resultado del Test de Respuesta Térmica				
Intervalo (h)	Pendiente (k)	λeff. (W/K.m)	Rb [K/(W/m)]	R2(Error cuadrático Acumulado)
0 – 73	1,98	1,41	0,235	0,7834
9 – 73	1,72	1,63	0,257	0,4398

Tabla 7.- Resumen de los resultados del primer ensayo

Segundo ensayo

Los resultados que se expondrán a continuación se referirán al segundo Test de Respuesta Térmica (TRT), que se realizó los últimos días del mes de abril del 2013. Donde se utilizó la misma instalación que para el primer ensayo. La toma de datos fue de forma manual, y se utilizaron los mismos instrumentos de medición, de tipo comercial. Una vez culminado el ensayo los datos se volcaron en una planilla de cálculo, y posteriormente se procesaron.

Determinación de la temperatura de suelo no perturbado

El ensayo se hizo sin calentar el fluido recirculante. Entro en régimen a las 13:50hrs y a partir de ese momento se registraron los datos

mostrado en la figura 10. El ensayo se terminó al día siguiente a las 11.20hrs. Se determinó una temperatura promedio del fluido en T_{sur}= 21,65 ºC.

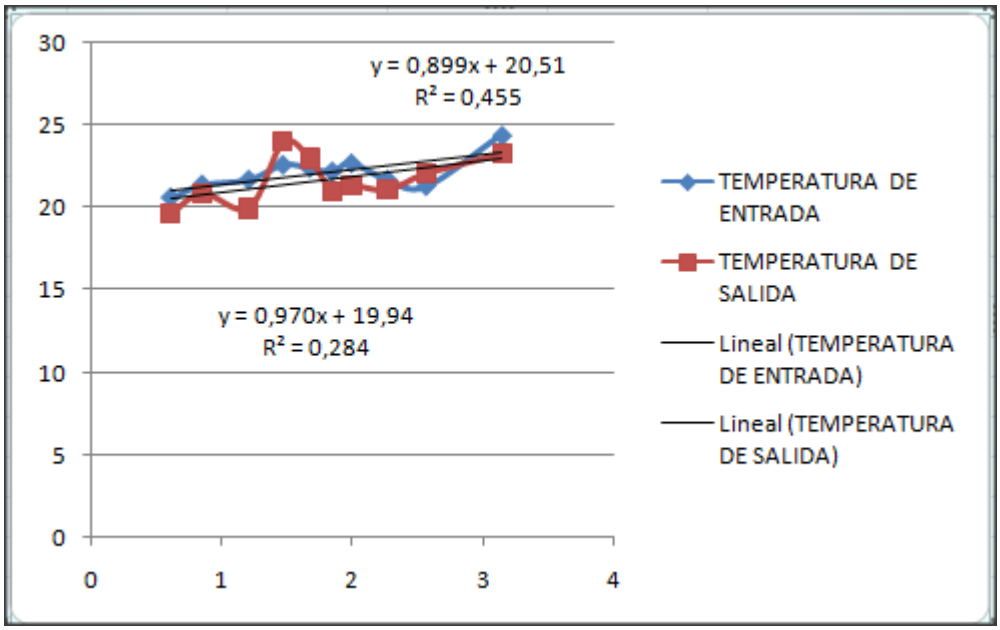

Figura 10 - Temperatura de entrada/salida sin perturbación del intercambiador

Determinación del coeficiente de conductividad térmica efectivo

El segundo ensayo, se comenzó el día 20/04/13 a las 11:40hs., y se finalizó el día 23/04/13 a las 11:46hs., se utilizó como fluido caloportador, una mezcla de agua y glicol, con una inyección de 818,9 watts de potencia y con un caudal circulante de 0,00042 m^3/seg.

En la figura 11 se muestra la evolución de la temperatura del fluido caloportador desde el momento en que se comenzó a inyectarle energía hasta la culminación del ensayo, también se muestra la recta de regresión lineal con su ecuación y el valor del error medio cuadrático.

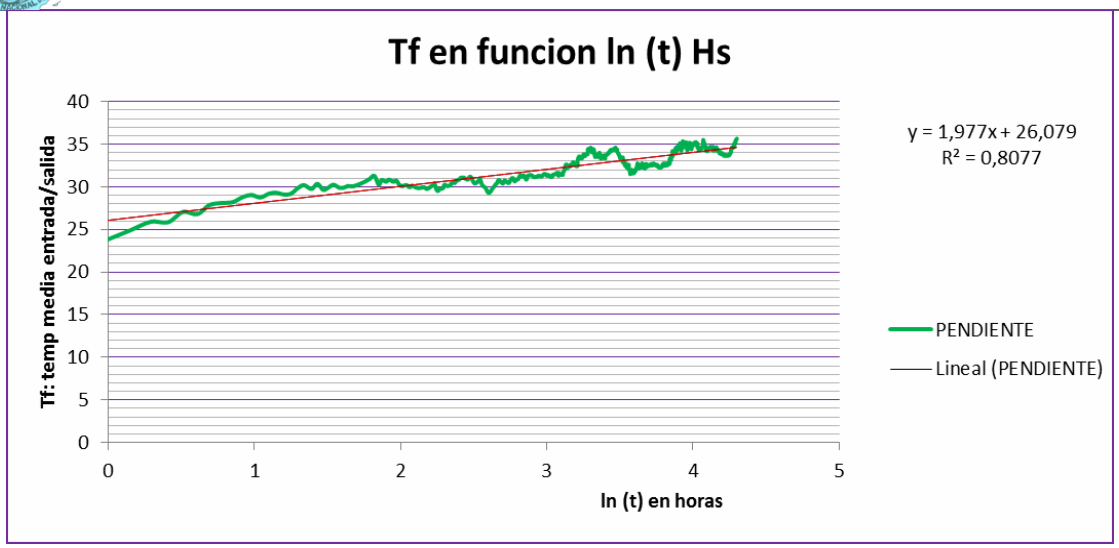

Figura 11 - Evolución de la temperatura media entrada/salida en función del ln (t) medido en horas.

Ahora se debe conocer en tiempo a partir del cual se puede evaluar la evolución de la temperatura media del fluido en función del logaritmo natural del tiempo en horas.

Este tiempo está dado por:

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

Donde, α: difusividad térmica del hormigón: α = 0,91*10^{-6} m^2/seg., r_0 = 0,075 m. distancia radial del centro del tubo del fluido caloportador al borde de la pared hormigón.

Por lo cual el tiempo valido para la evaluación de la pendiente es:

$$t = \frac{5*0{,}075^2}{0{,}91*10^{-6}} = 30907\ seg, \text{ aproximado 9hs}$$

Es decir 9 horas después de iniciado el ensayo, recién se evalúa la regresión lineal de la curva, que se muestra en la figura 12.

Figura 12 - Evolución con criterio de tiempo de la temperatura media entrada/salida en función del ln (t) medido en horas.

La curva obtenida desde el inicio del ensayo hasta las 9 horas se desprecia, por la aproximación de las funciones. En la figura 13 se observa la aproximación de las dos funciones, para los dos ensayos y sé muestra que al aumentar τ, la función [Gt] se aproxima a la función [ln (4t) – y].

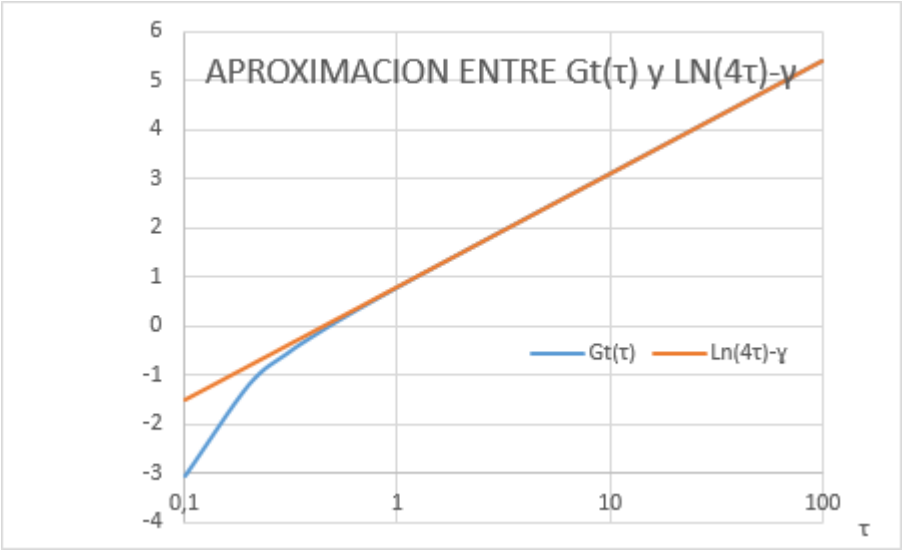

Figura 13 - Representación de las funciones [Gt] y [ln (4t) – y] con respecto a τ.

Con los datos del ensayo se hizo una regresión lineal y de ella se obtuvo la conductividad efectiva.

$$y = 2{,}283\,x + 24{,}929$$

La pendiente de la función experimental linealizada, k, representa

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$$

Como k es conocido, se puede calcular el valor de la conductividad efectiva como:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H}$$

Para este ensayo se obtuvo λ_{eff} = 1.23 W/mK, con Q=818.9 W, H=23.36m. y k=2.28

Determinación de la resistencia térmica

En la figura 14, se muestra el esquema de la resistencia térmica entre el fluido caloportador y la pared del pozo.

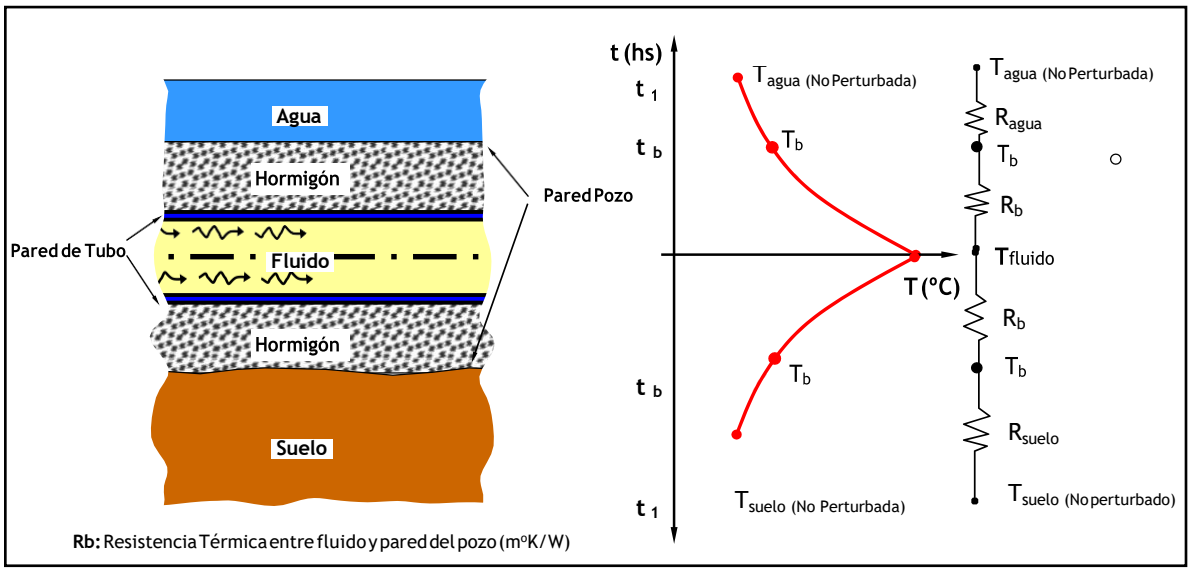

Figura 14 - Esquema de resistencia térmica R_b (K / (W / m)). Crédito de la imagen: Propia.

La resistencia del pozo se la calcula con la ecuación M, la cual se obtuvo despejando de la ecuación 18:

$$R_b = (T_f - T_{sur})\frac{H}{Q} - \frac{1}{4\pi\lambda}\left[ln\left[\frac{4\alpha t}{r_0^2}\right] - \gamma\right] \quad (30)$$

Luego se reemplazan los valores y se obtiene la resistencia térmica R_b (ºK / (W / m)) en la función del ln(t) medido en hs, con el criterio de tiempo. Esto se muestra en la figura 15.

Figura 15 - Evolución de Rb con criterio de tiempo.

El valor promedio aplicando criterio de tiempo resulto ser: $R_b = 0.087\ [{}^{o}K/\frac{W}{m}]$

La tabla 8, muestra los datos con los cuales se realizó el segundo ensayo.

Datos del ensayo	Valor
Q: Potencia inyectada (W)	818,9
q =Q/L Potencia por unidad de longitud de la tubería (W//m)	35,06
T_{sur}: Temperatura suelo no perturbado (ºC)	21,65
t: Tiempo del ensayo con perturbación (Hs)	72 hs.6min
L: Longitud efectiva del intercambiador (m)	23,36

Tabla 8.- Datos del segundo ensayo.

La tabla 9, muestra los resultados del segundo ensayo.

α: Difusividad térmica del hormigón (m2/seg)	Intervalo (h)	Pendiente: K	λeff (W/m*ºK)	Rb: (K/(W/m))	R2 (Error Cuadrático Acumulado)
0,91x10-6	0 - 72	1,97	1,42	0,117	0,807
0,91x10-6	9 - 72	2,28	1,23	0,087	0,6894

Tabla 9.- Resumen de los resultados del segundo ensayo

3.5.- Ajuste paramétrico de los datos experimentales

Se utilizó, como función de ajuste la solución al modelo matemático que representa el proceso de transferencia de energía térmica, con λeff y Rb obtenidos experimentalmente como variables de ajuste, figura 16. Donde se determina la evolución de Tf(t) en función del Ln (t) medido en hs. curva azul. A ésta se le superpone la curva de ajuste paramétrico de los datos experimentales, curva roja, donde se observó buen ajuste y bajo error medio cuadrático acumulado.

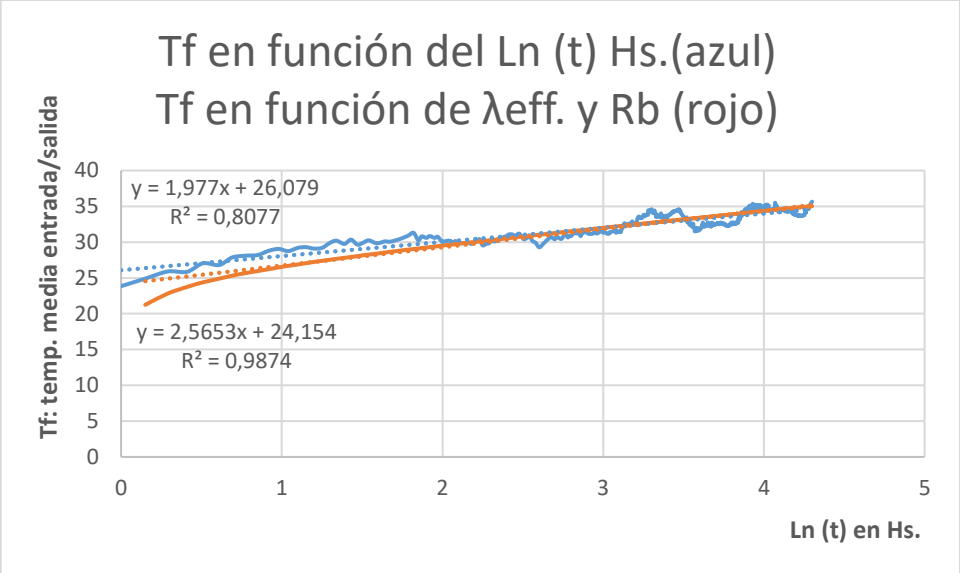

Figura 16 - Evolución de la temperatura media del fluido (curva azul) y superpuesta la curva de ajuste paramétrico (curva roja).

Se observó al inicio, una pequeña diferencia hasta un tiempo aproximado de 9 hs entre las dos curvas, luego las mismas tienden a superponerse.

3.6.- Enfoques de la planificación

Cuando se utilizan los intercambiadores geotérmicos la pregunta obligada es la tasa de extracción. Una idea simple es que el intercambiador geotérmico de energía térmica, tal como un quemador de gas ó combustible, es capaz de suministrar una potencia de calentamiento específico. Para ello se necesita determinar la longitud del intercambiador geotérmico.

La longitud del intercambiador geotérmico se determina por:

$$Longitud\ del\ intercanbiador\ geotermico\ (m) = \frac{Capacidad\ del\ Evaporador\ (W)}{Tasa\ de\ Extraccion\ Especifica\ (W/m)}$$

Ahora se necesita conocer la tasa de extracción específica, para ello

se remite a la Norma VDI 4640, de ella se puede obtener este valor en función del coeficiente de conductividad térmica efectivo λeff., y de las horas de funcionamiento, las cuales son 1800 hs y 2400 hs.

Para el valor del coeficiente de conductividad térmica efectivo encontrado de $\lambda\text{eff.} = 1{,}23\ [W/_{m*K}]\ \ <\ \ \lambda = 1{,}5\ [W/_{m*K}]$, la tasa de extracción específica es de $25\ [W/_{m}]\ para\ 1800\ hs$ y de $20\ [W/_{m}]\ para\ 2400\ hs$.

Estos valores se los extrajeron de la tabla 10 es extraída de la norma VDI 4640.

Horas de funcionamiento Subsuelo	1800 h	2400 h
	Capacidad térmica específica en W/m de sonda	
Valores orientativos generales:		
Subsuelo inapropiado (sedimento seco) (λ < 1,5 W/mK)	25	20
Subsuelo normal de roca consolidada y sedimento saturado con agua (λ < 3,0 W/mK)	60	50
Roca consolidada con elevada conductividad térmica (λ < 3,0 W/mK)	84	70
Rocas aisladas:		
Gravilla, arena, secas	< 25	< 20
Gravilla, arena, con contenido en agua	65 - 80	55 - 85
Corriente freática fuerte a través de gravilla y arena, para instalaciones individuales	80 - 100	80 - 100
Arcilla, limo, húmedos	35 - 50	30 - 40
Piedra caliza (maciza)	55 - 70	45 - 60
Piedra arenisca	65 - 80	55 - 65
Magmatitas ácidas (p.ej. granito)	65 - 85	55 - 70
Magmatitas básicas (p.ej. basalto)	40 - 65	35 - 55
Gneis	70 - 85	60 - 70

Tabla 10.- Extracto norma VDI 4640

Conocida la capacidad térmica especifica de extracción y la longitud del intercambiador, que en este caso es fijo, se obtuvo la potencia del evaporador como:

$$Potencia\ del\ evaporador\ (W) = Long.de\ la\ sonda\ (m) * Cap.Termica\ Esp.(W/m)$$

Para 1800 hs. funcionamiento

$$Potencia\ del\ evaporador\ (W) = 23{,}36\ (m) * 25\ (W/m) = 584\ W$$

Para 2400 hs. de funcionamiento

$$Potencia\ del\ evaporador\ (W) = 23{,}36\ (m) * 20\ (W/m) = 467{,}2\ W$$

Por lo cual se ha podido determinar la potencia del evaporador, para el intercambiador geotérmico realizado.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentará los resultados del análisis de los datos obtenido en el ensayo. Estos resultados mostrarán el coeficiente de conductividad térmica in situ, que se obtuvo de un intercambiador geotérmico horizontal y particular, descripto anteriormente.

Mediante le experimentación planteada en este trabajo se determinó el coeficiente de conductividad térmica efectivo, a partir de un modelo matemático correspondiente a un intercambiador estándar, y se obtuvo el valor del mismo, dentro del rango de los coeficientes estándar.

La tabla 11 muestra un resumen de los datos obtenidos en el presente trabajo, como también el correspondiente a un ensayo realizado en la Universidad Nacional del Noreste.

LOCALIZACIÓN	CRITERIO DE TIEMPO	PENDIENTE: K	λeff (W/m*ºK)	Rb: (K / (W/m)	SISTEMA
CORRIENTES			3,05	0,047	VERTICAL
SAN LUÍS 1	NINGÚN	1,98	1,41	0,235	HORIZONTAL
SAN LUÍS 1	9 hs	1,72	1,63	0,257	HORIZONTAL
SAN LUÍS 2	NINGÚN	1,97	1,42	0,117	HORIZONTAL
SAN LUÍS 2	9 hs	2,28	1,23	0,08	HORIZONTAL

Tabla 11.- Resultado de los TRT de Argentina

En la tabla 12 se muestra una recopilación de ensayos de respuesta térmica.

Borehole / TRT-unit		1 (NL)	2 (DE, UBeG)	3 (DE)
1, backfilled with Mol-sand		λ = 2.47 W/(m·K)	-	λ = 2.47 W/(m·K)
2, backfilled with graded sand		λ = 2.40 W/(m·K)	-	λ = 2.51 W/(m·K)
3, backfilled with bentonite		*test disturbed*	λ = 2.49 W/(m·K)	-
Location in Langen, Germany, tests by UBeG in 1999 (Langen 1) and 2000 (Langen 2 and 3)				
Borehole	Depth	Grout	thermal conductivity	borehole therm. res.
Langen 1	99 m	standard bentonite	λ = 2.8 W/(m·K)	r_b ~ 0.11 K/(W·m)
Langen 2	70 m	therm. enhanced	λ = 2.3 W/(m·K)	r_b ~ 0.08 K/(W·m)
Langen 3	70 m	therm. enhanced	λ = 2.2 W/(m·K)	r_b ~ 0.07 K/(W·m)
Location in Mainz, Germany, tests by UBeG in summer 2003				
Mainz 1	30 m	standard	λ = 1.43 W/(m·K)	r_b ~ 0.16 K/(W·m)
Mainz 2	30 m	standard	λ = 1.41 W/(m·K)	r_b ~ 0.20 K/(W·m)

Tabla 12.- Results of multiple TRT on the same site (Mol TRT workshop in 2000 and two projects in Germany)

Haciendo una comparación visual entre los resultados obtenidos en los dos ensayos de san Luis, con respectos a otros ensayos a nivel mundial, entonces podemos afirmar que los valores obtenidos de las características de subsuelo del intercambiador particular, están dentro del rango.

Cuando se comenzó con estos dos ensayos, estaba instalada la incertidumbre, de que valores obtenidos se encontrarán dentro del rango de los ensayos mundiales.

Incertidumbre resuelta, por lo cual se presenta este trabajo.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue realizar un ensayo de respuesta térmica in situ, para determinar el coeficiente de conductividad térmica λ_{eff} y la resistencia térmica de pozo R_b de un intercambiador geotérmico, horizontal y particular descripto.

En la construcción del intercambiador geotérmico se utilizó una perforación ya existente, lo cual limito el tendido y el entorno, está es la causa de que el coeficiente de conductividad térmica fuera desconocido. Se lo determinó con dos ensayos.

Los valores que se obtuvieron de $\lambda_{eff.}$ y Rb. no están fuera de contexto con respecto a valores de ensayos de respuesta térmica publicados, motivo que generó el presente trabajo.

El intercambiador se lo tomó como una caja negra que refleja el comportamiento del sistema. La entrada del sistema es la temperatura de ingreso, mientras que su respuesta es la temperatura de salida.

El método empleado para la evaluación de intercambiadores no convencionales arroja resultados aceptables para un emprendimiento comercial. Es decir, no es lo mismo partir de parámetros de laboratorios que de un TRT in situ.

Cabe acotar que los dos ensayos, se realizaron con instrumentos comerciales, además la toma de datos se realizó en forma manual.

Maestrando

Ing. Stefanini Valentín

Referencias bibliográficas

[1] Busso A., Reuss M., Müller J., Sograri N. (2000), Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica: Resultado de un ensayo de respuestas térmicas del subsuelo. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, Nº 1.

[2] Busso A., Reuss M., (2000), Ensayo de Respuestas Térmicas: Metodo de Evaluación de la Pendiente vs Ajuste Con Dos Parámetros Variables. Dpto de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNNE – Corrientes Argentina.

[3] Austin III, W. A., (1998), Development of an Situ System for Measuring Ground Termal Properties. Tesis de Maestría, Oklahoma State University.

[4] Eklöf C, Gehlin S. (1996). A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Master of science thesis 1996:198E. Luleå University of Technology. Sweden.

[5] Claesson, J. and Eskilson, P. 1988. "Conductive Heat Extraction to a deep Borehole, Thermal Analysis and Dimensioning Rules." Energy 13/6, pp. 509-527

[6] Eklöf, C. and Gehlin, S. 1996. "TED - a mobile equipment for thermal response test." MSc-thesis 1996:198E, LuTH, 62 p.

[7] Gehlin, S. and Nordell, B. 1997. "Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole." Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 103-108

[8] Hellström, G. 1997. "Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden." Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 115- 120

[9] Ingersoll, L.R. and Plass, H.J. 1948." Theory of the ground pipe heat source for the heat pump." Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, pp. 119-122

[10] Mands, E. and Sanner, B. 2001. "In-situ-determination of underground thermal parameters." Proc. IGD Germany 2001 Bad Urach, Suppl. pp. 45-54

[11] Mogensen, P. 1983. "Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages." Proc. Int Conf Subs Heat Storage, pp. 652-657

[12] Nordell, B. 2000. "Implementing Underground Thermal Energy Storage, main results and findings of IEA ECES Annex 8". Proc. Terrastock 2000 Stuttgart, pp. 7-12

[13] Sanner, B., Reuss, M. and Mands, E. 1999." Thermal Response Test - eine Methode zur In-Situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden. "Geothermische Energie 24-25/99, pp. 29-33

[14] Sanner, B. 2003. "Thermally enhanced grout and the reduction of borehole thermal resistance." Proc. Futurestock 2003 Warsaw, pp. 705-708

[15] Sanner, B. and Choi, B.-Y. 2005. "Ground Source Heat Pump Research in South Korea." Proc. WGC 2005 Antalya, paper #1435, pp. 1-2

[16] Sanner, B., Hellström, G., Spitler; J. and Gehlin, S. 2005. "Thermal Response Test – current status and world-wide application." Proc. WGC 2005 Antalya, paper #1436, pp. 1-9

[17] Sanner, B., Mands, E., Sauer, M. and Grundmann, E. 2007. " Technology, development status, and routine application of Thermal Response Test" Proc. EGC 2007 Unterhaching, paper # 194, pp. 1-6

[18] Gehlin Signhild. (2002). Thermal Response Test - Method, Development and Evaluation [Doctoral Thesis]. Luleå: Luleå University of Technology.

[19] Gehlin Singhild, N. B. (2003). Determining Undisturbed Ground Temperature for Thermal Response Test. ASHRAE, Vol. 109, Pt.1.

[20] Gehlin, S. (2002). Thermal Response Test - Method, Development and Evaluation. Luleå: Luleå University of Technology.

[21] Stefanini Valentín (2018) Ensayo de Respuesta Térmica en un Serpentín Horizontal -San Luis Argentina - I Encuentro de la red Iberoamericana de Investigación, Desarrollo y Transferencia Tecnológica para la Aplicación de las Energías Renovables y Cuidado del Ambiente. RibERA. Congreso Internacional-Corrientes Argentina.

[22] Stefanini Valentín (2018) Método de Validación Estadística de los Ensayo de Respuesta Térmica de Suelo - Serpentín Vertical vs Horizontal. Corrientes vs San Luis – Argentina. - I Encuentro de la red Iberoamericana de Investigación, Desarrollo y Transferencia Tecnológica para la Aplicación de las Energías Renovables y Cuidado del Ambiente. RibERA. Congreso Internacional-Corrientes Argentina.

ANEXO 1

REGISTRO FOTOGRAFICO DEL

TRT SAN LUIS

SECUENCIA DE FOTOGRAFIAS DEL BANCO DE ENSAYO REALIZADO

Foto 1.- Comienzo del tendido del intercambiador geotérmico.

Foto 2.- Acomodando el intercambiador

Foto 3.- Colocación del intercambiador geotérmico en la excavación

Foto 4.- Construcción tanque de expansión

Foto 5.- Detalle tanque de expansión

Foto 6.- Relleno con perlitas de telgopor, del espacio entre el tanque y la caja aislante.

Foto 7.- Termómetros digitales comerciales, para la toma de datos.

Foto 8.- Perforación en la tubería de entrada, para colocar el termómetro.

El 2ª termómetro se coloca a 10 cm de la salida del intercambiador enterrado.

Foto 9.- Termómetro colocado en la salida del intercambiador.

El 3ª termómetro se coloca a la entrada de la tubería en el tanque.

El 4º termómetro se coloca en la salida de la tubería del tanque.

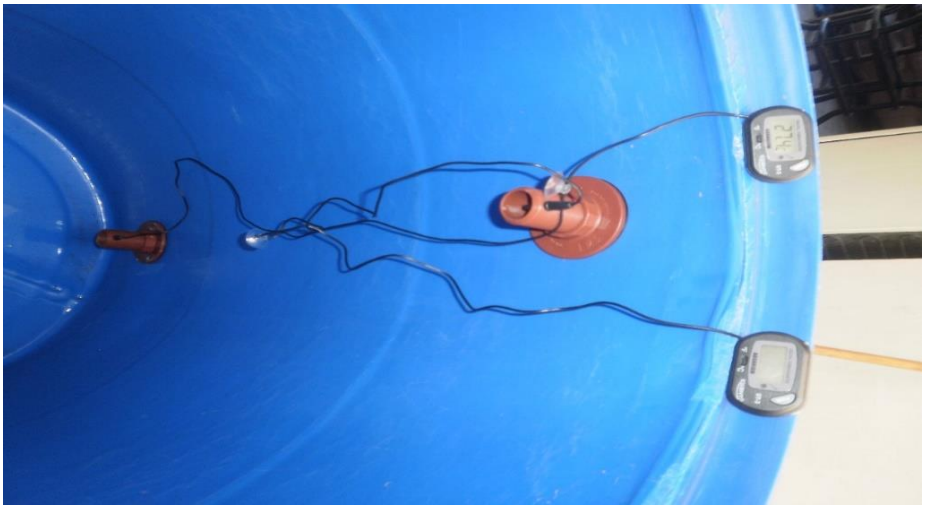

Foto 10.- Termómetros colocados en la entrada y salida del tanque de expansión.

CAUDALIMETRO

Se colocó un caudalímetro de línea mecánico.

Foto 11.-Caudalímetro en la entrada al tanque de expansión.

BOMBA DE CIRCULACION

Se colocó una bomba de circulación centrifuga

Foto 12.- Armado del acople de la bomba de circulación.

Foto 13.- Armado del sistema de circulación forzada del fluido portador de energía.

USO DE RESISTENCIA INMERSION

Foto 14.- Resistencia eléctrica de inmersión.

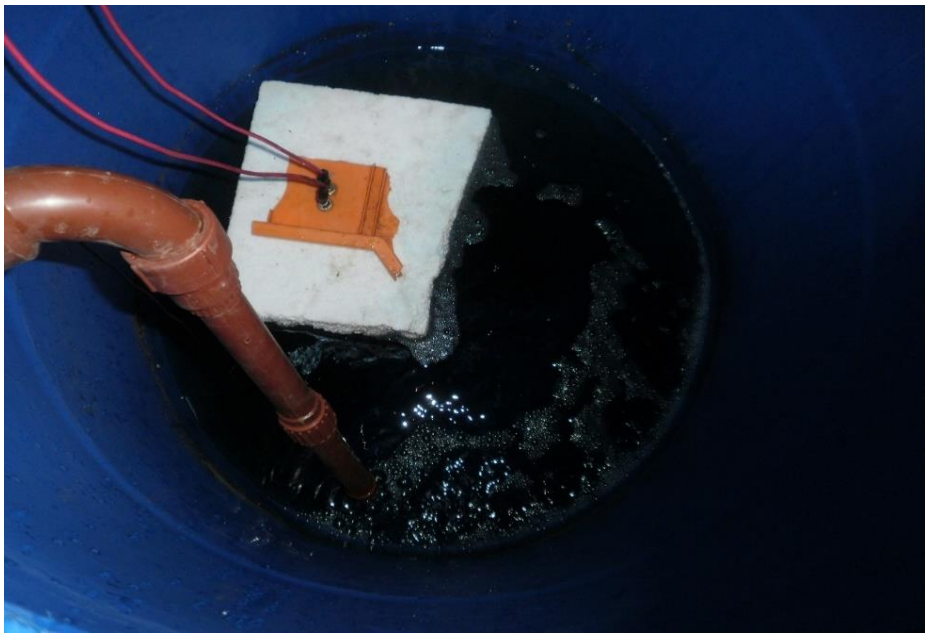

Foto 15.- Prueba de circulación del fluido portador de energía, con el calentador.

AISLACION DEL CIRCUITO DE CIRCULACION EXTERIOR.

Foto 16.- Aislación del circuito exterior.

Foto 17.- Aislación del circuito exterior.

TERMOMETRO PARA LA MEDICION DE LA TEMPERATURA DE SUBSUELO NO PERTURBADO.

Foto18.- Termómetro de suelo, enterrado a 5 cm.

TERMOMETRO PARA OBTENER LA TEMPERATURA DEL AGUA DE LA PILETA.

Foto 19.- Termómetro colocado en la pileta

INSTALACION y MEDICION ELECTRICA.

Foto 20.- Instalación eléctrica y de medición de potencia

ANEXO 2

TRABAJO ACEPTADO EN

GGW GEORG GEOTHERMAL WORKSHOP 2018

NEW GEOTHERMAL GENERATION

Join us at #GGW2018
taking place Nov. 14-15, 2018

Grand Hotel, Sigtúni 38, 105 Reykjavík Iceland

Gmail

Valentin Stefanini <stefanini824@gmail.com>

GGW2018: Abstract Notification

6 mensajes

Amel Barich <amel@georg.cluster.is> 31 de octubre de 2018, 14:27
Para: "stefanini824@gmail.com" <stefanini824@gmail.com>
CC: Info <info@georg.cluster.is>

Dear Valentín Stefanini,

Thank you for submitting your abstracts to the 2nd GEORG Geothermal Workshop which will be held in Reykjavik, Iceland, on 14 – 15 November 2018.

We are pleased to let you know that your contributions were accepted for the #GGW2018. You have initially requested to participate with Oral presentations, however, our Scientific Committee advised to have it rather as Poster Presentations.

The general programme of the event will be announced by the end of this week.

Registration:

If you have not registered yet, we advise you to register soon through the following link: https://geothermalworkshop.com/registration/ .

We look forward to seeing you at the Workshop soon!

Kind regards,

Amel Barich

On the behalf of the GGW2018 Organizing Committee

GEORG

Amel Barich, Ph.D. (Earth Sciences)

Project Manager – Strategy & Marketing

Geothermal Research Cluster – GEORG

Grensásvegur 9, 108 Reykjavík, Iceland

E-mail: amel@georg.cluster.is

Website: www.georg.cluster.is

< ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA EN UN SERPENTÍN HORIZONTAL SAN LUIS ARGENTINA >

List of authors *(underline corresponding author)*	**Ing. STEFANINI Valentín Antonio**
Institution/Company	Universidad Nacional de San Luis - Argentina
Address of corresponding author	Av. Lafinur N° 301 - San Luis – Capital - Argentina
E-mail of corresponding author	Stefanini28@hotmail.com.ar
Which theme does your abstract refer to (Workshop Themes (insert the right link))	☒ Upstream ☐ Midstream ☐ Downstream ☐ Cross-Cutting
Which presentation do you prefer	☒ Oral presentation ☐ Poster presentation (En español)

Abstract:

TEST OF THERMAL RESPONSE "IN SITE" OF A HORIZONTAL SERPENTÍN SAN LUIS – ARGENTINA

Engineer Stefanini Valentín Antonio

The objective is to describe a Thermal Response Test (TRT) "in situ", obtaining values of the effective thermal conductivity of the subsoil λ_{eff}, and the thermal resistance of the borehole of R_b, corresponding to a horizontal system of particular heat exchanger, made in San Luis Argentina.

This "in situ" test was based on the model of the infinite line source (ILS), and the solution to it was made by the graphical method of the slope, which uses the expression of the evolution of the average temperature of the working fluid, as a function of the time (t) and the borehole radius (r), around a linear heat source of constant power (Q) that can be assumed equal to the power of the BHE. Therefore, the thermal conductivity (λ_{eff}) is determined based on the slope (k) depending linearly on the medium temperature of the fluid as a function of the natural logarithm of time. (Kun Sang Lee, 2013).

The investigation determined the subsoil characteristics, not registered in the region, of the asymmetric horizontal coil, from the model for symmetric vertical exchangers (Eklöf C, Gehlin S., 1996).

TEST

An excavation for swimming pool (4.5 x 2.3 x 1.5) meters was used. On the 7.5 cm concrete floor, an effective 23.36 m long serpentine was placed PEAD ϕ ¾" K6 pipe suitable for water, holding it to a metal mesh and filling it with a 7.5 cm layer of concrete without additives.

An insulated expansion tank is placed with a solution of 100 litters of water with two litters of glycol, electrical resistance, circulation pump and measuring instruments.

The test begins on 04/19/2013 "without thermal disturbance", determining the undisturbed subsoil temperature, Tsur = 21.65 °C.

On 04/20/2013, the (TRT) began with disturbance. With a duration of 73 hours, culminating on 04/23/2013. The data collection was done manually every 10 minutes, with 818.9 watts of average power, 0.00042 (m3 / sec) of circulating flow. The data is loaded into a spreadsheet and processed.

Time criterion, 9 hours, starting point for evaluating the average temperature of the fluid according to the natural logarithm of time.

Obtained the value of λefec, we calculate the thermal resistance of the borehole R_b (ºK / (W / m)).

RESULTS TRT SAN LUIS ARGENTINA

α: Thermal diffusivity concrete **(m^2/seg)**	Criterion time	Slope **k**	**λ_{eff} (W/m*ºK)**	**R_b (K / (W/m))**
$0{,}91 \times 10^{-6}$	Total	1,97	1,42	0,117
$0{,}91 \times 10^{-6}$	9 hs	2,28	1,23	0,087

CONCLUSION

The λ_{eff}, obtained is the reflection of the proposed asymmetric system.

How correct is it? Then it was compared visually with respect to TRT worldwide, observing very similar results.

Applying a fast and economical method for the evaluation of unconventional exchangers, we obtain acceptable results for a commercial enterprise. That is to say, it is not the same to start from laboratory parameters, then those obtained from a TRT "in situ".

Keywords: TRT, horizontal exchanger, pending method.