



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Análisis de la variación de temperatura en pozo geotérmico
para la obtención de una correlación con resistencias térmicas
involucradas.**

POR: FERNANDA PAULINA OCHOA ESPINOZA

Habilitación profesional presentada al Departamento de Geofísica de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísica.

Profesor Guía: Arturo Belmonte Villanueva (UdeC)

David Zamora Barraza (UCM)

Dante Figueroa (UdeC)

8/01/2019

Concepción, Chile

Página de Agradecimientos

Agradecer tanto al departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, como a la Universidad Católica del Maule, por permitirme realizar esta habilitación profesional trabajando en conjunto con ambas casas de estudio.

A los profesores que participaron en el desarrollo de este trabajo, especialmente al profesor David Zamora, por tener la amabilidad de recibirme como una alumna más y darme la confianza necesaria para realizar este proyecto.

A mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Son un pilar fundamental en mi vida y me siento afortunada de tenerlos.

A mis amigos de la U y a la UdeC como tal, por todas esas experiencias que me hacen ser lo que soy ahora. A mis gemelas adoradas por todos los años compartiendo el 405 como un hogar que jamás olvidaré. A mis amigos de Valdivia, por todos los años de amistad y apoyo. A todos esos momentos inolvidables (y más de alguno olvidado) vividos en estos hermosos e impredecibles años universitarios.

Resumen

La eficiencia de un sistema de climatización geotérmico dependerá fuertemente de las propiedades térmicas del subsuelo en el que se trabaje, por lo que mientras más información se tenga de las propiedades de éste, mejor se podrá aprovechar la estabilidad en su temperatura, haciendo más conveniente su utilización. La necesidad de generar este tipo de conocimiento es la motivación de este trabajo donde se analizó desde un punto de vista teórico-práctico la capacidad de enfriamiento que tiene un intercambiador de calor vertical ubicado en el campus San Miguel de la Universidad Católica del Maule, en la ciudad de Talca, relacionando esta transferencia de calor, con las propiedades térmicas del subsuelo en estudio. Para dicho propósito se ocupó el instrumento Test de Respuesta Térmica el cual es un método que se realiza in situ para determinar las características térmicas del subsuelo, inyectando en forma constante calor al sondeo para analizar la respuesta térmica del mismo. Este método es utilizado mundialmente para analizar la eficiencia que pueden tener estos suelos para ser utilizados en sistemas de climatización geotérmicas. También se hizo uso de un sensor de nivel de agua, presión y temperatura para realizar perfiles de temperatura en función de la profundidad. Se pudo relacionar estos cambios de temperatura con las resistencias térmicas presentes en el terreno como el espesor de la tubería, relleno del pozo y subsuelo del lugar. La conductividad térmica efectiva del pozo que se obtuvo en este trabajo tiene un valor de $2,37 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$ la que es acorde a los estudios técnicos-teóricos que se tenían del lugar. Además, se obtuvo gráficas que muestran los perfiles de temperatura en profundidad del pozo en estudio en diferentes intervalos de tiempo. Se logró obtener una curva de como varía la temperatura promedio del pozo hasta recuperar, a partir de una temperatura mayor obtenida por la inyección de calor al sistema, su temperatura de equilibrio. Esta curva tiene forma logarítmica, ya que si bien durante las primeras siete horas, la temperatura del pozo decae abruptamente, transcurrido este tiempo, la pendiente va disminuyendo, llegando a demorarse hasta más de dos semanas para volver a su temperatura de equilibrio.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	9
1.1	Objetivos del estudio	11
2	Conceptos Generales	12
2.1	Contexto Energético	12
2.2	Energía renovable para climatización de ambientes.	13
2.3	Energía Geotérmica	13
2.4	Geotermia Residencial	14
2.4.1	Sistemas de captación de calor.....	16
2.4.2	Tipos de Instalación según el pozo	19
3	Marco Teórico	21
3.1	Test de respuesta Térmica.....	21
3.1.1	Modelo de fuente lineal.....	22
3.2	Transferencia de Calor	24
3.3	Transferencia de calor por conducción en sólidos.....	25
4	Instrumentos y métodos para objetivos prácticos	29
4.1	Instrumentos.....	29
4.1.1	Test de Respuesta Térmica (TRT)	30
4.1.2	Sensor nivel de agua, presión y temperatura (Level Troll 400)	31
4.2	Área de estudio	32
4.3	Acciones previas a la realización del estudio.	34
4.4	Procedimiento a seguir para realizar los ensayos.	35
4.4.1	Uso equipo de TRT.....	35
4.4.2	Uso sensor de temperatura (Level Troll 400).....	36
5	Desarrollo: toma de datos y resultados prácticos.....	38
5.1	Medición temperatura no perturbada del suelo	38
5.2	Mediciones en pozo con temperatura perturbada.	39
5.2.1	Ensayo 1	39
5.2.2	Ensayo 2	49
5.2.3	Ensayo 3	52
6	Análisis teórico	56

6.1	Curva teórica del proceso de enfriamiento del pozo.....	58
7	Interpretación: discusión sobre resultados y metodología	62
7.1	Curva de tendencia en ensayos prácticos.	62
7.2	Pendiente	63
7.3	Coeficiente de posición	64
8	Conclusiones.....	65
9	Bibliografía	67
Anexos	69
	Anexo 1: Test de Respuesta Térmica (TRT)	69
	Anexo 2: Sensor nivel de agua, presión y temperatura (Level Troll 400).....	70

Índice de tablas

Tabla 5-1: Resultados obtenidos de conductividad térmica considerando diferentes TD.	44
Tabla 5-2: Resumen de pruebas realizadas con el sensor de temperatura. La columna 1 muestra el tiempo transcurrido desde que el TRT fue apagado y columna 2 muestra la temperatura promedio del pozo de estudio considerando desde los 14 a los 69 [m] de profundidad.	47
Tabla 6-1: Resumen características de capas involucradas en la transferencia de calor entre el fluido caloportador y el terreno.	56
Tabla 6-2: Error cuadrático medio entre serie de datos y curva teórica generada variando espesor de terreno considerado.	57
Tabla 6-3: Valores atribuidos a variables térmicas del terreno para el análisis de su enfriamiento.	58
Tabla 6-4: Valores atribuidos a variables de la ecuación (16) de flujo de calor en el sistema.	59
Tabla 7-1: Resumen de curvas de tendencias obtenidas a partir de los datos prácticos. m: pendiente de la recta; c: coeficiente de posición. R cuadrado para mostrar qué tanto se ajusta la curva de tendencia a los datos.	62
Tabla 7-2: Ecuaciones de curvas del proceso de enfriamiento.	63

Índice de ilustraciones

Ilustración 2-1: Evolución estacional de las temperaturas a lo largo de un año para un punto situado a diferentes profundidades bajo la superficie. Lugar: Valencia. curva en rojo: oscilación natural, inmediatamente bajo la superficie; curva en magenta: datos tomados a 1 metro de la superficie; curva en azul claro: datos tomados a 2 metros de la superficie; curva en amarillo: datos tomados a 3 metros de la superficie; curva en azul oscuro: datos tomados a 10 metros de la superficie. Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2012)	15
Ilustración 2-2: Intercambiador geotérmico horizontal. (Rivas, 2016).....	17
Ilustración 2-3: Intercambiador vertical en U. (Rivas, 2016)	18
Ilustración 3-1: a) Representación sistema similar al que se tiene en este estudio. b) Pared cilíndrica de una sola capa (Pitts & Sissom, 2011).	26
Ilustración 3-2: Representación de variables utilizadas para calcular flujo de transferencia radial de calor por conducción.....	27
Ilustración 4-1: Foto test de Respuesta Térmica (TRT) conectado a pozo de estudio.	31
Ilustración 4-2: Sensor nivel de agua, presión y temperatura utilizado para este estudio, Level Troll 400.....	32
Ilustración 4-3: a) Plano Edificio Parque Tecnológico, Universidad Católica del Maule, Talca. b) Representación gráfica de un intercambiador vertical doble U, como el del estudio (Yu & Olson, 2018).	33
Ilustración 4-4: a) Tuberías correspondientes al pozo de estudio aún conectadas al sistema de climatización. b) Tuberías listas para ser utilizadas en el estudio.	34
Ilustración 4-5: Foto tomada para ilustrar la realización de toma de datos. Carrete demarcado cada 2 metros unido a Level Troll 400.	37
Ilustración 5-1: a) Perfil de temperatura en profundidad (bajando (sumergiendo) el instrumento). b) Perfil de temperaturas en profundidad. Curva azul muestra datos sumergiendo el instrumento y curva roja datos obtenidos extrayendo el instrumento.	38
Ilustración 5-2: Gráfico registro de temperaturas TRT durante Ensayo N°1.	40
Ilustración 5-3: Gráfico temperaturas registradas por TRT durante el Ensayo N°1, luego de remover errores.	41
Ilustración 5-4: Gráfica registro de temperaturas TRT de Ensayo N°1 con Ln(t) como eje x.....	42
Ilustración 5-5: Gráfico registro de temperatura media en TRT, Ensayo N°1, TD= 28,4 horas.	43
Ilustración 5-6: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura durante Ensayo N°1. Las horas corresponden al tiempo transcurrido desde que fue apagado el TRT.....	45

Ilustración 5-7: Perfiles de temperatura de pruebas correspondientes a Ensayo N°1 entre profundidades 0 y 12 metros.....	46
Ilustración 5-8: Perfiles de temperatura correspondientes a Ensayo N°1 entre profundidades 14 y 68 metros	46
Ilustración 5-9: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°1.	47
Ilustración 5-10: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento luego de apagar el TRT. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°1; curva roja segmentada: línea de tendencia calculada por Excel.....	48
Ilustración 5-11: Gráfica de variación de temperaturas del pozo de estudio, en proceso de enfriamiento, usando el Ln(t) en el eje x.	49
Ilustración 5-12: Registro de temperaturas de TRT durante ensayo N°2.....	50
Ilustración 5-13: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura durante Ensayo N°2.....	51
Ilustración 5-14: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°2.	51
Ilustración 5-15: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°2; curva roja segmentada: línea de tendencia que más se aproxima a la curva de datos reales calculada de forma automática por Excel.....	52
Ilustración 5-16: Registro de temperaturas de TRT durante ensayo N°3.....	53
Ilustración 5-17: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura (Level Troll 400). Ensayo N°3.....	54
Ilustración 5-18: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°3.	54
Ilustración 5-19: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°3; curva roja segmentada: línea de tendencia que más se aproxima a la curva de datos reales calculada de forma automática por Excel.....	55
Ilustración 6-1: Perfiles de temperatura alrededor de una tubería en diferentes instantes. (Zenteno Arenas, 2013)	57
Ilustración 6-2: Curva obtenida utilizando teoría y valores conocidos de conductividad, difusividad y resistividad térmica del terreno.	61
Ilustración 7-1: Curvas de proceso de enfriamiento de un pozo geotérmico. Curva roja: obtenida a partir de las mediciones realizadas durante ensayo N°1. Curva azul: obtenida a partir de la teoría.	63

Capítulo 1

1 Introducción

El uso de energías renovables se está expandiendo cada vez más a nivel internacional. Es sabido que es necesario disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero si se quiere conservar los recursos naturales de la forma que hoy en día se conocen.

Cuando se piensa en energías renovables, se vienen distintas ideas a la mente. Entre ellas, que son un posible reemplazo a las formas de generar energía que existen hoy día como combustibles fósiles, por decir alguna, las cuales traen diversas problemáticas ambientales. Si bien el uso de energías renovables puede estar ligado a plantas de generación eléctrica, existen otras formas de utilizar fuentes de energías limpias de manera más directa. Entre éstas se encuentra la energía geotérmica de baja entalpía. Esta forma de energía utiliza la temperatura del subsuelo, la cual no depende de condiciones ambientales externas que tengan lugar en superficie, para climatizar diferentes tipos de edificaciones. (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2012)

Los sistemas de climatización en base a geotermia consisten en arreglos de tuberías dispuesta de manera horizontal o vertical, por donde se hace circular un fluido que puede ser agua u agua con anticongelante, el cual se encarga de intercambiar calor con el subsuelo, ya sea cediendo o absorbiendo calor de éste. Además del arreglo de tuberías, estos sistemas utilizan una bomba de calor, que se encarga de llevar la temperatura del fluido a la deseada por el sistema de climatización. Finalmente, este fluido es transportado a través de un sistema de distribución que se encuentra en el interior de la edificación que se desea climatizar. En el capítulo de Conceptos generales, se entregarán mayores detalles acerca de estos sistemas.

Que tan eficiente sea el sistema de climatización geotérmico, dependerá fuertemente de las propiedades térmicas del subsuelo en el que se trabaje, por lo que mientras más estudios y, por ende, más información se tenga de las propiedades de éste, mejor se podrá aprovechar la estabilidad en su temperatura, haciendo más conveniente su utilización.

La necesidad e interés de tener más conocimientos acerca del comportamiento del subsuelo es la motivación de este trabajo, donde se analizará desde un punto de vista teórico-práctico la capacidad de enfriamiento que tiene un intercambiador de calor vertical, relacionando esta pérdida de calor, con las propiedades térmicas del subsuelo en estudio. Se realizará un análisis de la variación de temperatura de un pozo geotérmico para luego obtener una correlación con las resistencias térmicas que juegan un rol en él.

Para llevar a cabo esta investigación, se trabajará en uno de los pozos geotérmicos del Edificio Parque Tecnológico de la Universidad Católica del Maule (UCM) y se utilizarán dos instrumentos: Test de Repuesta Térmica (TRT), que es uno de los más utilizados a nivel mundial para conocer las propiedades térmicas del suelo, y un instrumento que monitorea y registra los cambios en nivel de agua, presión y temperatura llamado Level Troll 400, con el que se realizará perfiles de temperatura con respecto a la profundidad del pozo en estudio cada cierto intervalo de tiempo. La idea es poder suministrar calor al pozo en cuestión, sacándolo de su estado estacionario, para luego estudiar cómo se comporta en el proceso para volver a su estado de normalidad, en función de las resistencias térmicas del pozo.

1.1 Objetivos del estudio

Objetivo general

Analizar desde un punto de vista teórico-práctico el proceso de enfriamiento de un intercambiador de calor vertical correlacionando esta variación con las resistencias térmicas presentes en el pozo de estudio.

Objetivos específicos

- Determinar la conductividad térmica de un intercambiador vertical geotérmico por medio de un ensayo TRT.
- Determinar la variación de las temperaturas promedio de un pozo vertical geotérmico en función del tiempo durante su proceso de enfriamiento.
- Formular una curva teórica de temperaturas promedio de un pozo geotérmico en función del tiempo, considerando propiedades térmicas del terreno.
- Analizar la disminución de temperaturas en un pozo en función de sus propiedades térmicas y las del subsuelo que lo rodea.

Capítulo 2

2 Conceptos Generales

2.1 Contexto Energético

La búsqueda de fuentes de energía alternativas y métodos para reducir los consumos de derivados del petróleo constituye una preocupación esencial de la mayor parte de los gobiernos occidentales desde 1973, debido a la crisis del petróleo que ocurrió ese año.

Los altos precios de los combustibles de origen fósil despertaron la conciencia sobre la necesidad de hacer un uso más racional y eficiente de la matriz energética, así como también, de la conveniencia de la diversificación de ésta. (Acosta, 2011)

Si bien, las energías renovables comenzaron a ser utilizadas por un tema económico, el aumento de la población y con ello las altas tasas de emisiones de gases de efecto invernadero, han transformado su uso en uno de los objetivos principales para poder mitigar los efectos antropogénicos en el planeta.

Al observar el plano energético internacional, la calefacción y la refrigeración representa la mitad de la energía que se consume en Europa, y más del 75% de la misma procede de fuentes fósiles. Por ello, una mayor utilización de energías renovables en calefacción y refrigeración es vital y clave para avanzar hacia una economía baja en carbono. (Álvarez Pelegry, Larrea Basterra, & Suárez Diez, 2017)

A nivel nacional, del consumo total en electricidad y combustibles en los hogares chilenos, predomina el consumo en calefacción (29%) y en agua caliente (30%), sin embargo, la calefacción es más crítica cuando se analiza el consumo estacional de invierno. (Romero Ramos, 2011)

En Chile, en el año 2006, el rubro donde menos avances se han hecho, en cuanto a la eficiencia energética, es en el ámbito comercial, público y residencial, que representa el 25% del consumo total de energía a nivel nacional. La eficiencia energética en este rubro se ha relegado al diseño arquitectónico y estructural. (Romero Ramos, 2011). Si bien este punto es una arista importante de considerar, el tipo de fuente que se usa para poder calefaccionar estas edificaciones influirá directamente en el gasto total de energía.

2.2 Energía renovable para climatización de ambientes.

Según lo mencionado en la sección 2.1, el uso de energías renovables para climatizar ambientes es una arista en el ámbito energético que se debe desarrollar, si es que se quiere reducir la huella de carbono.

En cuanto a los tipos de energías más eficientes en climatización de espacios se encuentra la energía geotérmica de baja entalpía. Esta forma de energía aprovecha la inercia del subsuelo, el cual mantiene una temperatura entre 5°C y 30°C dependiendo de la latitud y de las condiciones geoquímicas que se considere. Este sistema de climatización se basa en una bomba de calor geotérmica (BCG) conectada a tubos intercambiadores de calor por los que fluye un fluido caloportador (agua, agua con anticongelante) que cede o absorbe calor hacia o desde el subsuelo, según los requerimientos del lugar a climatizar.

La eficiencia de los tipos de energías para climatización se puede ver a través del Coeficiente de Operatividad o Coeficiente de Rendimiento (COP) en el modo calefacción y del Coeficiente de Eficiencia Energética en el modo refrigeración, que, en ambos casos, es el coeficiente entre la potencia entregada y la potencia consumida. Este valor dependerá de qué tipo de energía se utiliza para el funcionamiento de la bomba. En el caso de BCG, este coeficiente varía entre 3 y 6. Por ejemplo, un COP igual a 4 indicará que la bomba producirá 4 unidades de energía de calefacción por cada unidad de energía eléctrica que consume (Lund & Sanner, 2004). Este valor es bastante elevado en comparación al rendimiento de otras fuentes de calor (combustibles fósiles, biomasa) que no superan un COP igual a 1, es decir, no son capaces de generar más de lo que le entregan. Además, las BCG no producen emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que son amigables con el medio ambiente.

Según la Unión Europea, los sistemas basados en geotermia residencial son los más eficientes para generar calor y frío, es por esto, que, en países como Suecia, más del 80% de las instalaciones de climatización de viviendas son geotérmicas (Geotics).

A continuación, se detallarán conceptos generales sobre energía geotérmica y sus diversos usos.

2.3 Energía Geotérmica

El término geotermia proviene del griego *geo* (Tierra) y *thermos* (calor), es decir, "calor de la tierra".

Se define como geotermia al conjunto de procesos industriales que intentan aprovechar las condiciones térmicas de la Tierra para producir energía eléctrica y/o calor útil para el ser humano. (LLopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

Se entiende como energía geotérmica, aquella energía que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El empleo de esta energía ha estado durante mucho tiempo limitado a áreas geográficas con condiciones geológicas muy concretas, pero los avances tecnológicos y los progresos en la prospección y perforación permiten explotar los recursos geotérmicos a temperaturas inferiores.

Se ha establecido una agrupación de la energía geotérmica, entre diferentes intervalos de temperatura. La división más utilizada corresponde a la expuesta en el “Código Minero” de Francia, que establece las siguientes definiciones de energía geotérmica:

- Alta Entalpía: Temperatura superior a 150°C, lo que permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Media Entalpía: Temperatura entre 90 y 150 °C, se puede producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, el cual alimenta a las centrales.
- Baja Entalpía: Temperatura entre 30 y 90 °C, insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y procesos industriales y agrícolas.
- Muy baja Entalpía: Temperatura menor a 30°C, puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.

2.4 Geotermia Residencial

La energía geotérmica de muy baja entalpía, también conocida como geotermia residencial o somera es la que se utiliza para desarrollar sistemas de climatización en edificaciones y viviendas, generando de forma ecológica calefacción y refrigeración.

La utilización del terreno como fuente térmica en instalaciones de climatización se ha convertido en un recurso energético renovable cada vez más en auge gracias a que mantiene una temperatura estable tanto en invierno como en verano, a partir de una determinada profundidad. (Casanova Pelaez, Palomar Carnicero, Lopez Garcia, & Cruz Peragon, 2014). En verano la superficie de la tierra se calienta debido a la intensidad de la radiación solar y elevadas temperaturas, pero el calor se propaga sólo algunos metros bajo la superficie, a pocos metros de profundidad la temperatura es sumamente estable y su valor se aproxima a la temperatura media anual de largo plazo en la superficie (Banks, 2012). Como se puede apreciar en la Ilustración 2-1 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la curva de color azul oscuro, que representa la variación de temperatura anual de un punto, ubicado a una profundidad de 10 metros bajo la superficie, no muestra una variación estacional significativa, por lo que la temperatura del suelo a esa profundidad no depende de las condiciones

climáticas en superficie de ese lugar (Espada Serrano, 2012), que este caso corresponde a la ciudad de Valencia, España.

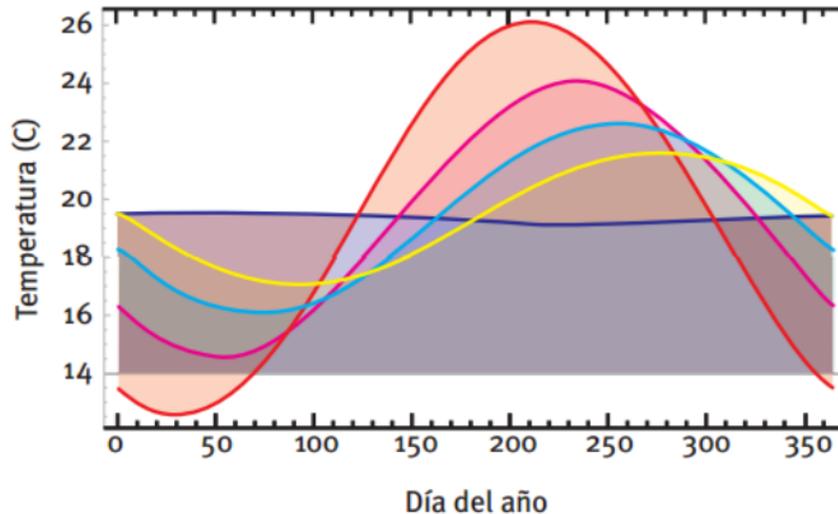


Ilustración 2-1: Evolución estacional de las temperaturas a lo largo de un año para un punto situado a diferentes profundidades bajo la superficie. Lugar: Valencia. curva en rojo: oscilación natural, inmediatamente bajo la superficie; curva en magenta: datos tomados a 1 metro de la superficie; curva en azul claro: datos tomados a 2 metros de la superficie; curva en amarillo: datos tomados a 3 metros de la superficie; curva en azul oscuro: datos tomados a 10 metros de la superficie. Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2012)

La energía almacenada bajo la corteza terrestre se extrae y distribuye mediante un sistema de climatización adecuado, el cual consiste en un intercambio de calor entre el terreno y el ambiente. Dicho sistema se compone de intercambiadores de calor (sistema de captación, pozos geotérmicos), una bomba de calor geotérmica y un sistema de distribución de calor a la vivienda. Las mejoras a este sistema se enfocan principalmente en la optimización del sistema y en la reducción de los costos de instalación.

Los sistemas de climatización geotérmica son integrales y poseen una larga vida útil ya que requieren poco mantenimiento y la misma instalación que sirve para calefaccionar una vivienda en invierno, sirve para refrigerarla en verano. (Jara Morales & Martínez Martínez, 2016)

2.4.1 Sistemas de captación de calor

2.4.1.1 Intercambiadores horizontales

Consiste en un circuito de tuberías, como el que se observa en la Ilustración 2-2, el cual se conforma por tramos de suministro y retorno. Para instalar este sistema se requiere un área de trabajo que sea 1,5 veces la superficie habitable que se quiere climatizar. Dicha superficie debe estar despejada, sin árboles ni raíces que interfieran en el intercambio de calor.

Los intercambiadores horizontales se instalan en los dos primeros metros de profundidad del terreno; las zanjas excavadas deben tener 0,6 metros de ancho y una profundidad tal, que permita dejar una altura libre obligada entre la superficie del suelo y la tubería de 1,2 metros. Cada zanja entrega aproximadamente entre 20 y 29 watts de energía por metro lineal. (Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency , 2004)

El sistema está compuesto por uno o varios circuitos de tuberías, existiendo diversas configuraciones de distribución, por ejemplo, slinky, helicoidal. La elección de la configuración depende de la demanda energética a disipar y de la superficie disponible para su instalación, pero no se ahondará en mayores detalles ya que no se relaciona con el fin de este trabajo.

El líquido que circula por el interior de las tuberías debe ser apto para el tipo de tubería y los requerimientos del sistema, no tóxico y compatible con la naturaleza.

En los tramos de suministro y retorno, se agrupan las tuberías en colectores de distribución para conducir el caudal del líquido refrigerante a la bomba de calor geotérmica.

Debido a la baja profundidad de las tuberías, los factores que influyen en el comportamiento de este sistema son la radiación solar, tanto directa como indirecta, el viento, la lluvia y agua de deshielo. Es por esto, que el funcionamiento del sistema depende de la energía almacenada en el terreno durante el verano, y una forma de conseguir mayor capacidad de almacenamiento es mantener la humedad de éste.

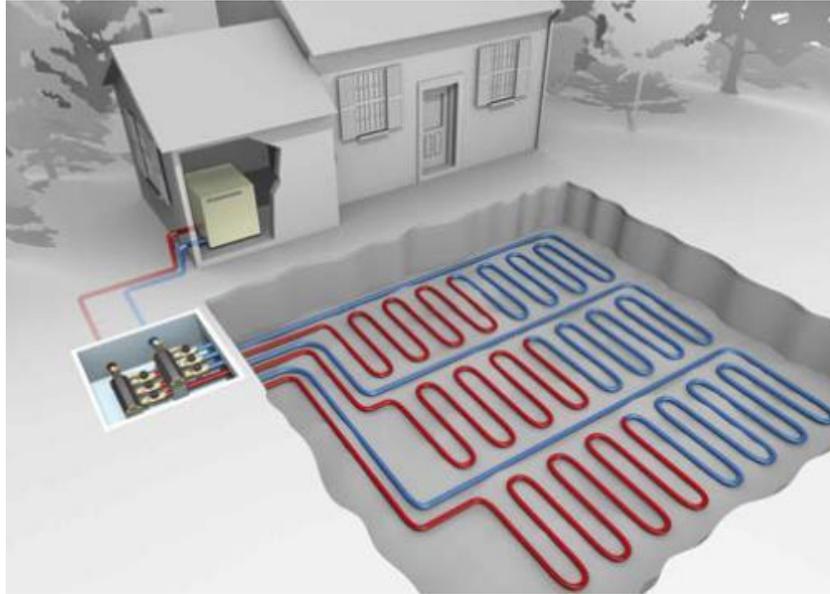


Ilustración 2-2: Intercambiador geotérmico horizontal. (Rivas, 2016)

El intercambiador horizontal tiene la ventaja de poseer mayor rentabilidad y un bajo costo de instalación en comparación al intercambiador vertical, lo que lo hace el más común para climatizar viviendas. Sin embargo, se considera como desventaja, que al momento de elegirlo, se debe tener en consideración que la superficie destinada a su instalación no debe ser hormigonada ni pavimentada posteriormente, para asegurar el buen intercambio de calor y no se debe plantar árboles con raíces profundas que puedan dañar los colectores. (Jara Morales & Martínez Martínez, 2016)

2.4.1.2 Intercambiador vertical

Consiste en una serie de tubos de polietileno de alta densidad (HDPE), en forma de U o doble U. los que tienen diámetros que varían entre los 32 y 40 mm.

Estos tubos van enterrados en uno o varios pozos, cuya profundidad bordea los 50-200 m, y cuyo diámetro tiene directa relación con el diámetro y distanciamiento de las tuberías que son introducidas.

En el caso de instalaciones verticales, dicho calor contenido en el subsuelo se encuentra a una baja profundidad, partiendo desde los 5 m y no superando los 200 m bajo la corteza terrestre. A partir de los 15 m de profundidad la temperatura almacenado por el subsuelo permanece constante. Desde los 20 m en adelante dicha temperatura aumenta en 3°C cada 100 m (Jara Morales & Martínez Martínez, 2016).

La profundidad exacta de los pozos depende de la superficie a climatizar y la cantidad de perforaciones que se realicen. Para determinarla se considera una relación de 100-130% metros de profundidad con respecto a la superficie de la vivienda; los distanciamientos entre tuberías suelen ser entre los 50-60 mm, medidos desde el centro de los tubos.

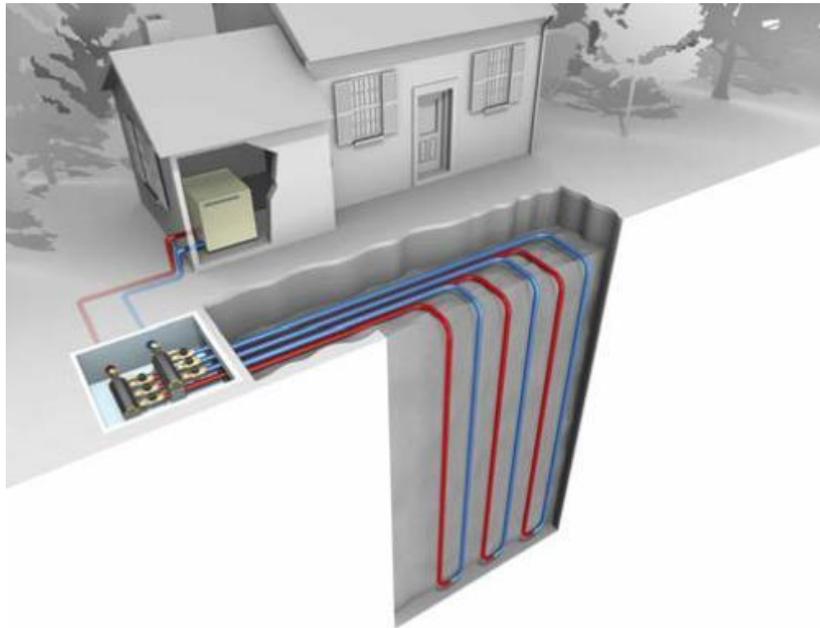


Ilustración 2-3: Intercambiador vertical en U. (Rivas, 2016)

La configuración en U consiste en un par de cañerías rectas unidas por una curva. El objetivo es tener un tubo de ida y uno de vuelta para el fluido, que ingrese por una de las tuberías y salga por la otra con el calor ya captado (ver Ilustración 2-3). Ahora bien, con el objetivo de aumentar la transferencia térmica desde el pozo al circuito y reducir la cantidad de perforaciones, se utiliza, en algunos casos, la configuración de doble U, la cual tiene dos tuberías para bajar el fluido y dos para subirlo. Esta sonda en U doble, llamada sonda RAUGEO PE-Xa, está compuesta por dos sondas en U individuales cruzadas y unidas entre ellas. La particularidad de esta sonda radica en que prescinde de una soldadura, porque los tubos de PE-Xa vienen curvados de fábrica en el pie de la sonda, con lo cual constituye un tubo sin uniones en el terreno, sin soldaduras. El pie curvado de la sonda está protegido adicionalmente con una resina de poliéster especial reforzado con fibra de vidrio (REHAU, 2018).

Esta instalación no es afectada por los factores climáticos externos y necesita una menor longitud de tubo, debido a que éstos tienen una mayor transferencia de calor por metro lineal de captador. Los intercambiadores verticales captan una temperatura estable aproximada de 15°C y entrega aproximadamente entre 32 y

43 watts de energía por metro perforado (Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency , 2004).

El intercambio de calor con el subsuelo es muy importante en estas instalaciones ya que condiciona el funcionamiento de la instalación en su totalidad. De ahí la importancia de estudiar los parámetros que rigen el intercambio térmico en el subsuelo (Fernández Bellver, 2013). La longitud de los pozos intercambiadores de calor es crucial para un diseño óptimo y de bajo costo y se condiciona directamente al comportamiento del intercambio de calor que se da entre el pozo y el subsuelo. Para el diseño de este tipo de sistema es necesario conocer valores como la capacidad de transferencia térmica del pozo, tamaño y configuraciones, como también el tipo de material de relleno que se utilizará. Es por esto por lo que la conductividad térmica del suelo y su resistencia térmica son valores que se necesitan determinar para un apropiado diseño del sistema. (Monzó, 2011)

La ventaja principal de estos sistemas es requerir una escasa superficie de terreno libre para su instalación y poder ser implementada tanto en construcciones existentes como en ejecución. Si bien es eficiente y tiene un mayor rendimiento que los intercambiadores horizontales, su ejecución implica un alto costo de inversión, lo cual se considera una desventaja, ya que requiere perforaciones verticales a mayor profundidad y de equipos especiales para efectuarlas. (Jara Morales & Martínez Martínez, 2016)

En el caso de intercambiadores verticales, existe una distinción entre sistema abierto y cerrado, según como sea el arreglo de tubos a través de los cuales el fluido portador de calor fluye por el pozo.

2.4.2 Tipos de Instalación según el pozo

2.4.2.1 Sistema abierto

El agua subterránea, que contiene el subsuelo, se extrae del pozo a través de un solo tubo plástico. Después de enfriar/calentar el agua en una bomba de calor, el agua es reinyectada al pozo.

La principal ventaja de este arreglo es que el fluido portador de calor es en contacto directo con las rocas del pozo. Esto lleva a una muy buena transferencia de calor entre el fluido portador de calor y las rocas adyacentes. Es importante mencionar que se requieren ciertas condiciones geohidrológicas y geoquímicas favorables para la construcción de este tipo de pozo. Además, la temperatura de extracción debe ser sobre los 0°C para evitar el congelamiento.

No se ahondará más sobre este tipo de instalaciones ya que no es de interés para este trabajo en específico.

2.4.2.2 Sistema cerrado

Cuando se inserta uno o más tubos plásticos en forma de U, se obtiene un sistema cerrado. El fluido portador de calor que circula a través del sistema está completamente separado del medio circundante. Esto hace posible usar otros tipos de fluido como agua con anticongelantes y así poder usarlo en temperaturas menores a 0°C. La transferencia de calor no es tan buena como en un sistema abierto, ya que la transferencia de calor entre el fluido portador de calor y el suelo de alrededor debe ser a través del material del tubo y de cuál sea el relleno que se utilizó en el pozo (mortero utilizado para darle estabilidad al pozo, por ejemplo: mezcla de arena, cemento y bentonita). Esto significará que el sistema tendrá una mayor resistencia térmica a la transferencia de calor que debe ocurrir, lo que reduce la capacidad del sistema.

A pesar de esto, el hecho de tener un sistema cerrado ayuda a la mantención de las tuberías y de las bombas de calor, ya que el fluido con el que se trabaja se encuentra libre de minerales y/o partículas pequeñas que pueden disminuir la vida útil de estas instalaciones. Además, en los sistemas cerrados, no se perturban las aguas subterráneas que pueda haber cerca del pozo, por lo que el sistema es independiente a la presencia o ausencia de éstas. (Eklöf & Gehlin, 1996).

Para el diseño de instalaciones que aprovechen este recurso es necesario conocer las características térmicas del suelo, como se mencionó anteriormente, entre las que se encuentran la conductividad, difusividad y temperatura del suelo inalterado. A partir de estas características, se dimensiona el intercambiador geotérmico (profundidad, diámetro y número de sondas). Para este fin, se ha desarrollado y construido un equipo que permite realizar ensayos de respuesta térmica del terreno, para conocer las características del suelo anteriormente mencionadas. Este equipo es llamado Test de Respuesta Térmica (TRT), del cual se hablará con mayor detalle en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

3 Marco Teórico

En la sección Geotermia Residencial, se expuso de manera general lo que es la energía geotérmica y los principales conceptos que se deben conocer al momento de hablar sobre geotermia residencial. Si bien es información necesaria para tener un conocimiento más completo acerca de esta energía, para la realización de este trabajo, el enfoque irá hacia las características de los sistemas verticales y un tipo de instalación cerrada, dado que no se trabajará con aguas subterráneas del lugar.

El capítulo que viene a continuación enfocará su atención en lo que respecta al comportamiento del suelo desde el punto de vista térmico, con el objetivo de tener una mejor base teórica al momento de trabajar con los datos que se obtengan de manera práctica.

Como se mencionó en la sección Intercambiador vertical, el suelo se mantiene a una temperatura relativamente constante a partir de los 15 metros de profundidad. Esto quiere decir que no importan las condiciones ambientales que tengan lugar a nivel superficial, ya que el suelo, a partir de esa profundidad, no se perturba debido a estas condiciones. Como el objetivo de este trabajo tiene que ver con el enfriamiento del suelo, es necesario perturbar el estado de equilibrio del suelo y observar cómo éste vuelve a su normalidad. Para esto, se utilizará un equipo llamado Test de Respuesta Térmica, que es mundialmente utilizado para calcular ciertas propiedades térmicas del subsuelo, como la conductividad térmica del terreno. En este trabajo, además de darle ese uso, también será utilizado como la fuente de calor que se encargará de aumentar la temperatura del líquido intercambiador de calor, que en este caso es agua, el cual circula a través de las tuberías ubicadas en el pozo, hasta alcanzar una cierta temperatura.

3.1 Test de respuesta Térmica

La respuesta térmica del pozo es el cambio que ocurre en su temperatura cuando un fluido portador de calor fluye a través de los intercambiadores de calor por un cierto periodo de tiempo. (Monzó, 2011)

El estudio de la temperatura del fluido con respecto al tiempo permite la estimación de las propiedades térmicas alrededor del pozo.

Hoy en día el instrumento llamado Test de Respuesta Térmica (TRT) es ampliamente utilizado para determinar las propiedades térmicas del suelo. Para la evaluación del TRT se hacen ciertas suposiciones (Sharqawy, 2009):

- La transferencia de calor por convección no es considerada. Solo transferencia por conducción.
- Se considera solo la conducción en el eje radial del pozo. La componente vertical no es considerada.

El test de respuesta térmica es un método efectivo para la determinación de las propiedades térmicas del suelo. En el test, una carga térmica conocida (potencia) es aplicada a los pozos intercambiadores de calor y se registra de manera precisa las temperaturas de entrada y salida del fluido circulante (en este caso, agua).

Las temperaturas de entrada y salida de los pozos intercambiadores de calor, como también el caudal y la potencia introducida, son registradas a través de un datalogger tipo Testo.

Unas de las principales propiedades térmicas que se puede medir con el TRT, es la conductividad térmica del suelo que es la capacidad del suelo de transferir el calor de las paredes del pozo al suelo de alrededor y viceversa. Esta propiedad es importante de calcular ya que, como se explicará más adelante, es una de las variables que se necesita para calcular la transferencia de calor que existe entre el pozo y el suelo circundante.

La conductividad térmica se relaciona a la capacidad térmica volumétrica c_p , que es la capacidad del suelo de almacenar energía térmica y con la difusividad térmica (α) de la siguiente manera:

$$\lambda = \rho \cdot c_p \cdot \alpha \quad (1)$$

Los principales modelos analíticos usados para evaluar los datos de respuesta térmica son los modelos de fuente lineal y fuente cilíndrica. El problema de transferencia de calor entre el pozo y la región infinita circundante se asume como una solución del modelo de fuente lineal y cilíndrico.

3.1.1 Modelo de fuente lineal

Mogensen (1983) fue el primero en aplicar el modelo de fuente lineal para estimar la conductividad térmica del suelo a través de datos experimentales. Este modelo se ocupa por su simplicidad y rápidos resultados. La temperatura del suelo puede ser escrita en función del tiempo (t) y el radio (r) alrededor de una fuente lineal con una tasa constante de inyección de calor (q) a través de una línea que va en el eje vertical del pozo inserto en un medio sólido infinito (Carslaw & Jaeger, 1959)

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (2)$$

En la ecuación (2) la función exponencial integral E_1 puede ser simplificada si se cumple la condición a continuación mencionada,

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \quad , \quad \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (7)$$

donde γ es la constante de Euler= 0,5772

Se debe mencionar que el máximo error es de un 2,5% para valores de $\left(\frac{\alpha t}{r^2}\right) \geq 20$ y un error de un 10% para $\left(\frac{\alpha t}{r^2}\right) \geq 5$.

Se debe considerar que la temperatura se evalúa en el radio del pozo, $r = r_b$ por lo que es necesario tomar en consideración los efectos de la resistencia térmica entre el fluido portador de calor y la pared del pozo, que se define como (Sharqawy, 2009) la suma entre la resistencia térmica del fluido (R_{fluido}), la resistencia térmica de la pared del pozo (R_{pared}) y la resistencia térmica del relleno utilizado (mortero) (R_{relleno}) que se puede resumir en la ecuación

$$R_b = R_{\text{fluido}} + R_{\text{pared}} + R_{\text{relleno}} \quad (3)$$

Teniendo esto en consideración la diferencia de temperatura entre el fluido en la tubería (T_f) y la pared del pozo (T_b) se relaciona con la resistencia térmica del pozo (R_b) y la transferencia de calor (q) de la siguiente manera:

$$T_f - T_b = q \cdot R_b \quad (4)$$

Combinando ambas ecuaciones se tiene que

$$T_f^q(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + q \cdot R_b + T_0 \quad (5)$$

Con un error menor al 2% la ecuación puede ser usada para inyecciones de calor en conductos cilíndricos (Ingersoll and Plass 1948) si:

$$t > \left(\frac{20 r^2}{\alpha}\right) \quad (6)$$

Considerando todas las aproximaciones, la ecuación que muestra la temperatura del fluido queda expresada como:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma\right) + q \cdot R_b + T_0 \quad (8)$$

Reordenando esta ecuación (del Valle Fernández, 2012), se obtiene que la ecuación del TRT queda definida como:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + q \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left[\frac{4\alpha}{r^2}\right] - \gamma \right) \right] + T_0 \quad (9)$$

Esta ecuación puede ser aproximada como:

$$T_f(t) = m \cdot \ln(t) + c \quad (10)$$

Siendo m la pendiente de la curva, que está relacionada a la conductividad térmica de la forma

$$m = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (11)$$

Y c sería la magnitud del valor de temperatura cuando el tiempo es igual a cero y es conocido como el valor de la ordenada en el origen. Si la resistencia térmica es considerada como un valor constante en el tiempo, c se puede definir en torno a este parámetro como en la siguiente ecuación:

$$c = q \cdot \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left[\frac{4\alpha}{r^2} \right] - \gamma \right) \right] + T_0 \quad (12)$$

Es importante considerar que esta ecuación es válida cuando el proceso térmico en el pozo es cercano a una condición estacionaria, por lo que las primeras horas del test de respuesta térmica no deben ser consideradas.

Por otra parte, si la variación de la resistencia térmica en el tiempo se requiere, este parámetro será calculado a través de la ecuación (ecuación que muestra la temperatura del fluido), de la siguiente manera: (Solo se reordena de forma diferente y se despeja R_b).

$$R_b = \frac{T_f(t) - T_0}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (13)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el rol que cumplirá el TRT, además de entregarnos un valor in situ de la conductividad y resistencia térmica del terreno, será proveer de calor al pozo geotérmico, por lo que después de apagar el equipo, el pozo en estudio se encontrará a una temperatura mayor a la temperatura no perturbada del subsuelo. Como existirá una diferencia de temperatura entre el pozo y el subsuelo, ocurrirá una transferencia de calor.

3.2 Transferencia de Calor

Por teoría se conoce que, de forma general, existen tres formas de transferir calor: conducción, donde la transmisión de calor es por contacto y sin transferencia de materia; convección, que es la transmisión de calor por la transferencia de la propia materia portadora del calor y radiación, donde la transmisión de energía es por medio de la emisión de ondas electromagnéticas o fotones (Ji, 2015). En el caso de un pozo geotérmico, las principales formas de transferencia de calor son por conducción y por convección. Conducción debido a que existe un contacto directo entre el agua contenida en la tubería con las paredes de éstas y éstas a su vez con el material de relleno, que finalmente

colinda con el subsuelo. Por otro lado, también existe una transferencia de calor por convección, debido a que la temperatura del agua a lo largo de la tubería puede no ser constante por lo que existirá un transporte de ésta por diferencias de temperatura. Como este estudio se enfoca en cómo se relacionan las temperaturas del pozo con el subsuelo que lo rodea, se considerará que la transferencia de calor que ocurre es netamente por conducción y en la dirección radial de la tubería. Además, las diferencias de temperatura a lo largo del pozo son menores que en el eje radial de éste y por lo mismo es la transferencia de calor por conducción la que predomina.

3.3 Transferencia de calor por conducción en sólidos.

Como bien se sabe, el calor tiende a fluir desde objetos calientes a objetos fríos. Una fórmula, conocida como la Ley de Fourier, nombrada por el físico francés llamado Joseph Fourier, permite cuantificar el flujo de calor conducido a través de un bloque de un cierto material dado. La ley de Fourier se define como (Banks, 2012),

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (14)$$

donde,

Q = flujo de calor en Joules por segundo, que equivale a Watts [$J s^{-1} = W$]

λ = conductividad térmica del material. [$W m^{-1}K^{-1}$]

A = área de la sección transversal del bloque de material que se está considerando [m^2]

θ = temperatura [$^{\circ}C$ o K]

x = coordenada de distancia en dirección de la disminución de temperatura (notar que el calor fluye en dirección de la disminución de temperatura: por esto el signo negativo en la ecuación) [m]

$\frac{d\theta}{dx}$ = gradiente de temperatura [$K m^{-1}$]

Para el estudio en curso, la geometría que se utilizará corresponde a un sistema cilíndrico, ya que se desea calcular el flujo de calor conducido desde los intercambiadores de calor (tuberías) hacia el subsuelo y, por ende, calcular como se va perdiendo este calor en el tiempo. Mediante esta forma, se puede entender el proceso de enfriamiento del subsuelo.

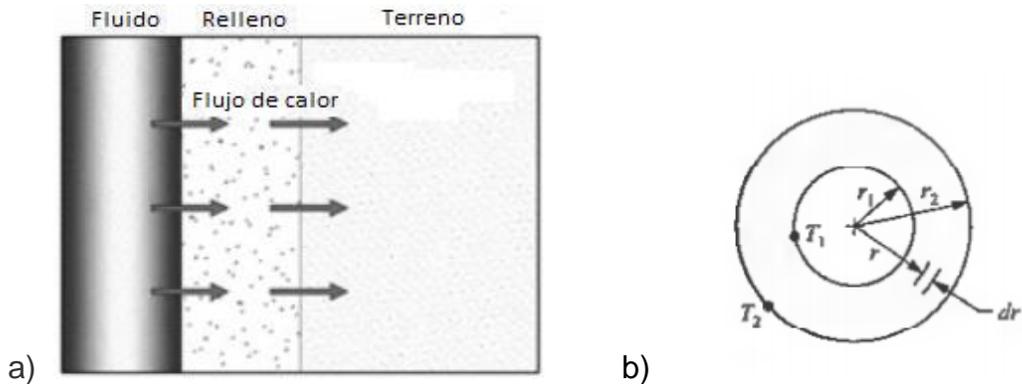


Ilustración 3-1: a) Representación sistema similar al que se tiene en este estudio. b) Pared cilíndrica de una sola capa (Pitts & Sissom, 2011).

La ecuación que describe el flujo de calor en un sistema radial, como se observa en la Ilustración 3-1 esta descrita por,

$$q = \frac{2\pi\lambda L(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (15)$$

Para este estudio, se tiene un sistema un tanto más complejo que lo que se muestra la Ilustración 3-1b, ya que las capas a considerar son más de una, siendo éstas el espesor de la tubería, el espesor del relleno del pozo y el ancho de terreno, ancho que va desde el punto del terreno que limita con el borde del pozo hasta el punto en el que su temperatura no se ve perturbada por los cambios de temperatura ocurridos en el pozo. Adaptando la ecuación (15), a una situación que involucre tres capas, se obtiene la ecuación (16).

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\left(\frac{1}{\lambda_a}\right)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_b}\right)\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (16)$$

En la Ilustración 3-2 Ilustración 3-2, se muestra de forma gráfica a que corresponde cada una de estas variables, considerando un sistema cilíndrico genérico.

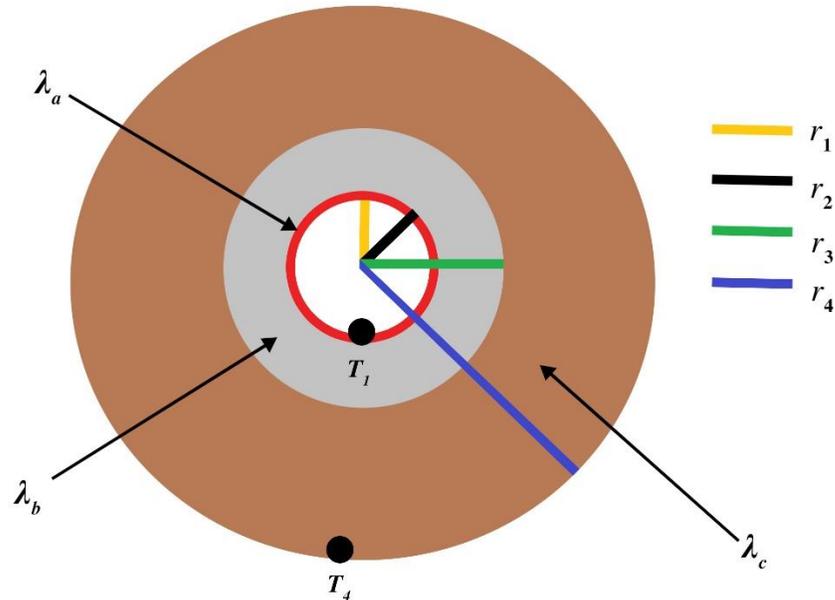


Ilustración 3-2: Representación de variables utilizadas para calcular flujo de transferencia radial de calor por conducción.

Cada una de estas variables se definen como,

q = flujo de calor en el sistema. [W]

L = Largo del cilindro. [m]

λ_a = Conductividad térmica de la primera capa cilíndrica. [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

λ_b = Conductividad térmica de la segunda capa cilíndrica. [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

λ_c = Conductividad térmica de la tercera capa. [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

T_1 = Temperatura del agua al interior del cilindro. [$^{\circ}\text{C}$ o K]

T_4 = Temperatura del medio sin perturbar. [$^{\circ}\text{C}$ o K]

r_1 = distancia desde el centro del sistema al borde interno de la primera capa involucrada en la transferencia. [m]

r_2 = distancia entre el centro del sistema hasta el borde externo de la primera capa. [m]

r_3 = distancia entre el centro del sistema y borde externo de la segunda capa. [m]

r_4 = distancia que existe entre el centro del cilindro y punto que se encuentra sin ser afectado por los cambios que ocurran en éste. [m]

Capítulo 4

4 Instrumentos y métodos para objetivos prácticos

Como se estipuló en la sección 1.1, el objetivo de este trabajo será analizar desde un punto de vista teórico-práctico el proceso de enfriamiento de un intercambiador de calor vertical correlacionando esta variación con las resistencias térmicas presentes en el pozo de estudio.

En cuanto a los objetivos específicos mencionados en la sección 1.1, los dos primeros, que son determinar la conductividad térmica (λ) de un intercambiador vertical geotérmico por medio de un ensayo TRT y determinar la variación de las temperaturas promedio de un pozo vertical geotérmico en función del tiempo durante su proceso de enfriamiento, tienen un enfoque práctico. Para poder cumplir con estos objetivos se deberán obtener datos reales desde un pozo geotérmico, el cual será descrito en la sección 4.2. La forma de trabajo será perturbar este pozo de estudio sacándolo de su estado de equilibrio lo que se hará aumentando su temperatura mediante el uso del instrumento TRT, aprovechando de calcular λ , para luego registrar y estudiar su comportamiento durante el proceso de enfriamiento utilizando un sensor de nivel de agua, presión y temperatura. Los dos instrumentos empleados para realizar este trabajo práctico se presentarán a continuación en la sección 4.1 y la metodología para obtener los datos en la sección 4.4.

La segunda parte del trabajo se enfocará en cumplir con los otros dos objetivos específicos: formular una curva teórica de temperaturas promedio de un pozo geotérmico en función del tiempo y analizar la disminución de temperaturas en un pozo en función de sus propiedades térmicas y las del subsuelo que lo rodea. Estos objetivos, a diferencia de los anteriores, tienen un enfoque no experimental por lo que se necesitará realizar un estudio teórico del pozo geotérmico, considerando sus propiedades térmicas entregadas por la teoría (algunas comprobadas por los ensayos in situ realizados), el cual tendrá como propósito simular como sería el proceso de enfriamiento del pozo, en caso de no contar con datos reales de éste. Estos objetivos se trabajarán en la sección 6 para no redundar la información, ya que, por el hecho de tener un enfoque teórico, se presentará junto con el análisis.

4.1 Instrumentos

Los instrumentos que se utilizarán para realizar este estudio serán el Test de Respuesta Térmica (TRT) y el sensor de nivel de agua, presión y temperatura Level Troll 400. Ambos instrumentos fueron facilitados por la Universidad Católica

del Maule. A continuación, se describirá en que consiste cada uno de estos instrumentos.

4.1.1 Test de Respuesta Térmica (TRT)

El TRT es un instrumento que permite determinar el valor in situ de la conductividad térmica efectiva del terreno (λ) como de la resistencia térmica del terreno (R_b). Consiste en hacer circular un fluido caloportador durante un cierto periodo de tiempo, a través de un pozo intercambiador de calor y monitorear la temperatura de entrada y salida del sistema.

Para almacenar los datos que se van obteniendo, el TRT cuenta con dos registradores programables por ordenador: Testo 177-T4 y Testo 175-S2.

La función de cada uno de ellos será:

Testo 177-T4: registrar y almacenar datos de las temperaturas de impulsión al pozo, retorno y ambiente. Desde el PC se programará para que almacene en su memoria, cada 30 segundos, los datos registrados por las termocuplas. El error asociado a este datalogger es de +/- 0,3°C entre -100 a +70°C.

Testo 175-S2: registrar y almacenar datos del caudal instantáneo circulante por el sistema. Desde el PC, se programará para que almacene en su memoria los datos registrados por el caudalímetro que forma parte del equipo y lo haga cada 30 segundos.

La curva de temperatura media del sistema en función del Ln del tiempo es utilizada para calcular propiedades térmicas del pozo geotérmico en estudio mediante ecuaciones presentadas en la sección 3.1.1. La Ilustración 4-1 muestra una fotografía del instrumento. Más detalles sobre los componentes del equipo se describen en el anexo 1.



Ilustración 4-1: Foto test de Respuesta Térmica (TRT) conectado a pozo de estudio.

4.1.2 Sensor nivel de agua, presión y temperatura (Level Troll 400)

Este instrumento cumple la función de medir y registrar la profundidad, presión y temperatura del agua de forma simultánea cada un cierto intervalo de tiempo.



Ilustración 4-2: Sensor nivel de agua, presión y temperatura utilizado para este estudio, Level Troll 400

El instrumento viene con un dispositivo USB para poder conectarlo al PC y se programa utilizando el software Win-Situ 5, el cual se obtiene de forma gratuita desde la web. Mediante este software, es posible configurar ciertas características del funcionamiento del sensor, entre las cuales se encuentran: unidades de medida, método de registro, intervalo de tiempo para almacenamiento, tiempo de partida y término de cada medición, nivel de agua y densidad del agua. Más detalles sobre la configuración, se puede encontrar en el Anexo 2.

Este instrumento, como se mencionó previamente, además de registrar datos de temperatura, almacena datos de nivel de agua y presión. Como en este trabajo, la variable temperatura es la que se considerará para realizar los análisis, para efectos prácticos, se hará referencia a este instrumento como sensor de temperatura.

4.2 Área de estudio

Para desarrollar este trabajo y cumplir con los objetivos propuestos, se trabajará con un pozo geotérmico en particular, donde se realizarán distintos ensayos a partir de los cuales se podrá analizar el comportamiento térmico del subsuelo que lo rodea.

El pozo de estudio corresponderá a uno ubicado en el perímetro del edificio Parque Tecnológico de la UCM ubicado en el sector oriente de la ciudad de Talca, localizado en las coordenadas geográficas 35.4355 S, 71.62 O. Este edificio forma parte del “Proyecto de aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en edificios de usos múltiples: Parque Tecnológico de la UCM” (Castro, Pascual, & Indacochea, 2012). Esta edificación cuenta con un sistema de calefacción

geotérmico basado en diez pozos intercambiadores de calor con profundidades que varían entre los 60 y 80 metros, además de bombas de calor ubicadas en el subterráneo del edificio, junto con su respectivo sistema de distribución en el interior. El arreglo de pozos se puede observar en la Ilustración 4-3a, donde están señalizados mediante puntos que forman una L (esquina superior derecha de la imagen). Estos pozos tienen una configuración doble U, esquema representado en la Ilustración 4-3b.

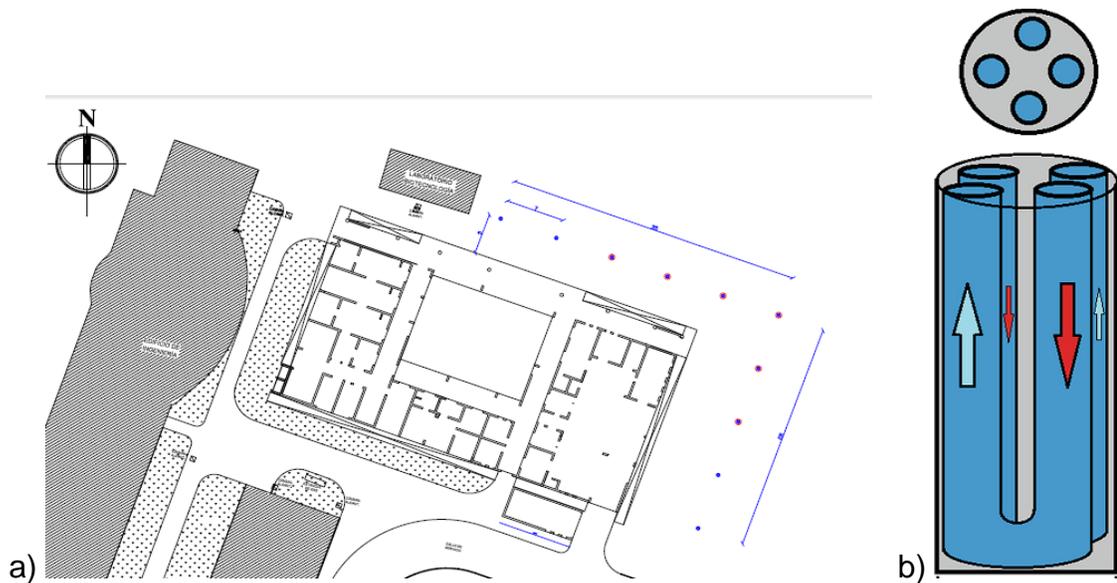


Ilustración 4-3: a) Plano Edificio Parque Tecnológico, Universidad Católica del Maule, Talca. b) Representación gráfica de un intercambiador vertical doble U, como el del estudio (Yu & Olson, 2018).

Cada uno de estos pozos de 140 mm de diámetro, alberga tuberías, que son las encargadas de contener el líquido intercambiador de calor, y un material de relleno. Este material se utiliza para llenar los espacios entre las tuberías y la perforación realizada y, de esa manera, darle mayor estabilidad al pozo. Este arreglo ocurre desde los 2 metros de profundidad aproximadamente. En los 2 metros más someros, las tuberías se redistribuyen de manera horizontal hasta llegar al lugar donde se unen las tuberías de todos los pozos del sistema llegando hasta la sala de operaciones, que es donde se ubican las bombas de calor.

El pozo escogido para el estudio fue seleccionado por su cercanía a una fuente eléctrica y, además, que coincidiera con un lugar de poca circulación de personas ya que como las tuberías no se encuentran a ras de suelo, se debe hacer una excavación para dejarlas al descubierto. Esto podría significar un peligro para los transeúntes del lugar por lo que se tomaron las precauciones pertinentes.

4.3 Acciones previas a la realización del estudio.

Teniendo escogido el pozo por las razones previamente mencionadas, se procederá a excavar el sector en cuestión y dejar las tuberías descubiertas para tener mayor facilidad al momento de trabajar. (Ilustración 4-4a)

Posteriormente se deberá romper las tuberías de forma que quede abierto el extremo superior de éstas y así puedan ser conectadas con mayor facilidad a los instrumentos que se utilizarán (Ilustración 4-4b.)

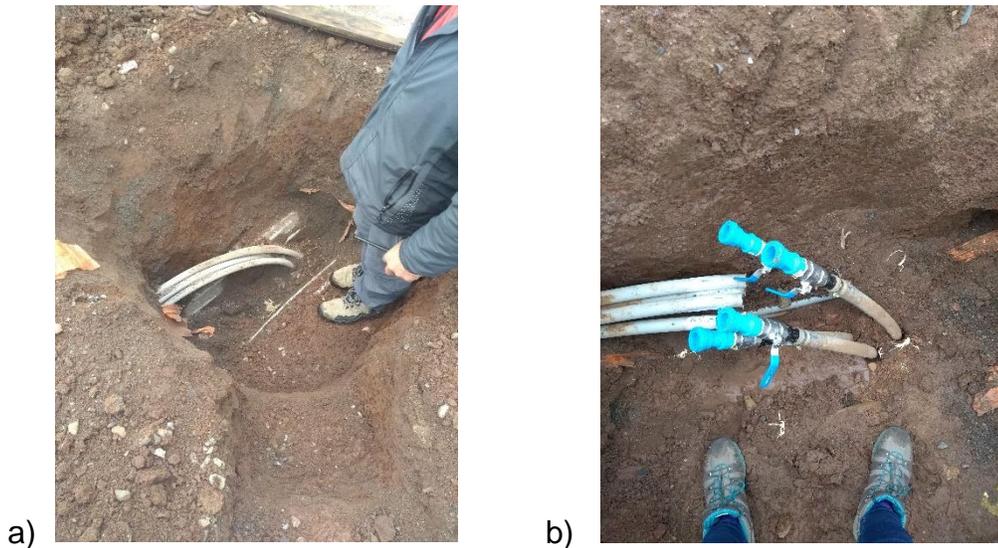


Ilustración 4-4: a) Tuberías correspondientes al pozo de estudio aún conectadas al sistema de climatización. b) Tuberías listas para ser utilizadas en el estudio.

En primera instancia se realizará un perfil de temperaturas del suelo sin perturbar. Para poder comenzar con este trabajo, lo primero es la limpieza de las tuberías del pozo a estudiar (Pozo Nr.7). Para esto, se renuevan las aguas que se encuentran en las tuberías, principalmente para remover posibles sedimentos, y se dejan las tuberías llenas de agua limpia durante 14 días con el propósito que se nivele con la temperatura real del terreno.

Antes de analizar cómo se comporta el suelo después de inyectarle calor, es necesario conocer la temperatura real del suelo, por lo que se realizan diversos perfiles de temperaturas utilizando el sensor de temperatura. Con estas mediciones, se puede saber qué temperaturas se pueden encontrar al interior del pozo a diferentes profundidades.

4.4 Procedimiento a seguir para realizar los ensayos.

4.4.1 Uso equipo de TRT

Como el objetivo de este trabajo es analizar la capacidad de enfriamiento de un pozo geotérmico, lo primero será suministrarle una cierta cantidad de calor para sacarlo de su estado de equilibrio aumentando su temperatura.

El equipo que se utilizará para aumentar la temperatura del pozo será el instrumento TRT (Ilustración 4-11).

Se debe tener en cuenta los siguientes detalles previo al encendido del equipo para que la adquisición de datos se realice de forma correcta.

- La teoría del TRT considera que se trabaja idealmente con una potencia constante (Beier, 2012), por lo que es de vital importancia asegurarse que no haya ninguna fuga tanto en las tuberías como en el circuito hidráulico del equipo, ya que esto afectaría de forma directa al caudal del flujo y, por ende, a la potencia con la que trabajará el equipo.
- Se recomienda trabajar con una presión en el sistema mayor a 2 bares. En este caso, gran parte del arreglo de tuberías se encuentra bajo la tierra, por lo que se espera que la expansión de las tuberías debido al aumento de la temperatura no implique una disminución significativa en la presión. Para evitar cualquier complicación, se esperará hasta alcanzar una presión cercana a 3 bares, para comenzar con el ensayo.
- Al ser el TRT influenciado por las condiciones ambientales que haya durante los días que se realice el ensayo, se buscará aislar lo mejor posible cubriendo el módulo con planchas con poliestireno expandido. Además, se cubrirá con una esponja especial los flexibles del TRT junto con el tramo de tuberías que quedan expuestas.

Una vez cumplida estas condiciones, se procederá al encendido del equipo. Los datos se irán registrando en los dos registradores Testo con los que cuenta el equipo.

Si bien el objetivo de este trabajo tiene que ver con el enfriamiento del pozo, también se aprovechará de utilizar el TRT para calcular de manera in situ el valor de la conductividad térmica efectiva del terreno (λ). Este valor será utilizado para analizar la curva de enfriamiento del pozo por lo que es importante encontrar un valor lo más cercano al real.

Con el propósito de encontrar el valor de (λ), en el primer ensayo que se tome, se dejará funcionando el TRT hasta que registre una temperatura constante tanto de entrada como de salida del pozo. El propósito es conseguir un estado estacionario, teniendo el equipo encendido.

Una vez se haya alcanzado el estado estacionario en las temperaturas del pozo, se apagará el TRT. Una vez apagado, se procederá a liberar la presión que se encuentre en el circuito, para luego desconectar los flexibles de las tuberías y dejarlas listas para poder introducir del sensor de temperatura.

4.4.2 Uso sensor de temperatura (Level Troll 400)

Para poder registrar la evolución en la temperatura del pozo una vez apagado el TRT, se utilizará el instrumento Level troll 400 para obtener perfiles de temperatura con respecto a la profundidad. Se tendrá perfiles de este tipo cada vez que se introduzca este instrumento en las tuberías.

Para utilizar el sensor de temperatura, lo primero es configurarlo de manera que registre los datos que interesan para este estudio (ver sección 4.1.2). Una vez configurado el instrumento, se desconecta del cable dispositivo USB y se procede a insertar en el pozo.

Para asegurar el equipo, éste descenderá por las tuberías conectado a un cable de acero forrado en PVC para evitar su oxidación y de esa manera proteger el instrumento.

Con el objetivo de tomar muestras de forma precisa, se etiquetó el cable con huincha americana cada dos metros (Ilustración 4-5), para poder ir bajándolo, cada un minuto, el mismo delta de profundidad. Se deja un minuto, ya que se comprobó en ensayos que usando tiempos menores el instrumento no alcanza a estabilizarse y para tiempos mayores no había diferencias con la temperatura registrada al minuto. Se asumirá que la temperatura del agua que se encuentra en la tubería corresponde a la temperatura del suelo en esa profundidad colindando con el borde de la tubería.



Ilustración 4-5: Foto tomada para ilustrar la realización de toma de datos. Carrete demarcado cada 2 metros unido a Level Troll 400.

Se introducirá el sensor de temperatura pasado una hora luego de desconectado el TRT, y luego se repetirá este proceso cada dos horas durante las primeras doce horas después de apagado el TRT.

Transcurridas las doce primeras horas, se introducirá el sensor las veces que sea necesario, hasta que registre la temperatura del terreno, la cual fue medida previo al primero ensayo de TRT en el pozo.

Capítulo 5

5 Desarrollo: toma de datos y resultados prácticos.

En este estudio se utilizarán datos obtenidos en tres ensayos. Como se mencionó en la metodología, cada uno de estos ensayos involucra el uso del TRT y el sensor de temperatura. En este capítulo, se mostrarán detalles acerca de la toma de ensayos realizados y los resultados obtenidos.

5.1 Medición temperatura no perturbada del suelo

Es necesario tener conocimiento acerca de cuál es la temperatura a la que se encuentra el suelo cuando no existe alguna fuente externa que lo perturbe. Para realizar esta medición, se limpiaron y llenaron nuevamente las tuberías con agua y se dejaron sin intervenir por un tiempo de dos semanas, para que ésta entrara en equilibrio con el suelo.

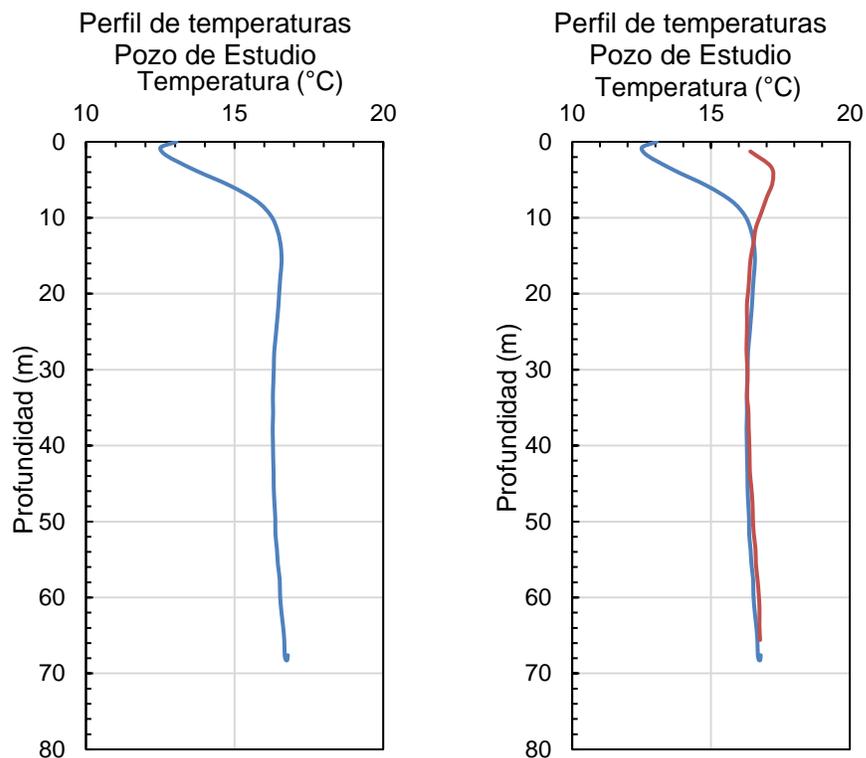


Ilustración 5-1: a) Perfil de temperatura en profundidad (bajando (sumergiendo) el instrumento). b) Perfil de temperaturas en profundidad. Curva azul: muestra datos sumergiendo el instrumento; curva roja: datos obtenidos extrayendo el instrumento.

En la Ilustración 5-1, se pueden observar dos gráficos de la temperatura no perturbada del suelo. En la Ilustración 5-1a, se observa el perfil de temperatura en profundidad cuando se va introduciendo el sensor de temperatura. Recordar de la metodología que se deja transcurrir un minuto en cada medición (cada dos metros), para que el instrumento registre la temperatura real de ese punto. En la Ilustración 5-1b, están sobrepuesto los gráficos que muestran las temperaturas al ir introduciendo el instrumento (curva azul) y al ir extrayendo el sensor (curva roja). Se puede notar que el instrumento revuelve el agua que se encuentra en la tubería, alterando las temperaturas en reposo del sondaje, por lo que solo se considera válida la curva azul. Por esto es importante esperar un cierto tiempo (dos horas), para volver a realizar otra medición.

La temperatura promedio del pozo, considerando desde los 14 a 68 metros, ya que desde esa profundidad aproximadamente, la temperatura no se ve influenciada por condiciones ambientales externas, es de 16°C.

5.2 Mediciones en pozo con temperatura perturbada.

El estudio consta de tres diferentes ensayos, los cuales tienen distintas duraciones, pero todos involucran el uso del TRT como del sensor de temperatura. Se describirá cada ensayo por separado. Todos los ensayos fueron realizados en el pozo Nr.7 del Edificio Parque Tecnológico de la Universidad Católica del Maule.

5.2.1 Ensayo 1

5.2.1.1 Ensayo N°1 – TRT

El primer ensayo de TRT se llevó a cabo durante los días 17 y 21 de agosto del 2018. Tuvo una duración de 93 horas y un minuto. En la Ilustración 5-2, se puede ver el registro completo de temperaturas del ensayo N°1; temperatura de entrada al pozo (T_{entrada}), temperatura de salida (T_{salida}) y temperatura media (T_{media})

Ensayo N°1- Registro de Temperaturas TRT

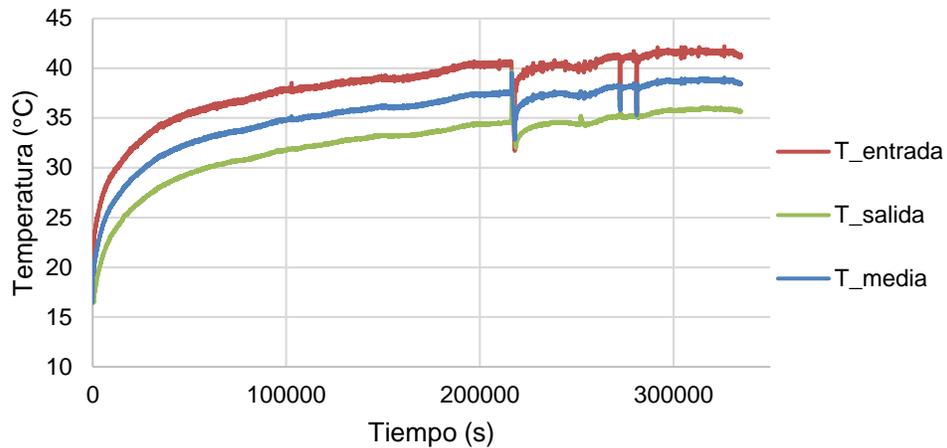


Ilustración 5-2: Gráfico registro de temperaturas TRT durante Ensayo N°1.

Al finalizar este ensayo, el último registro que se tiene de la temperatura de entrada al pozo (T_{entrada}) es de $41,1^{\circ}\text{C}$, la que se asumirá como la T° promedio del pozo y será utilizada como la temperatura desde la cuál éste se comienza a enfriar.

Como se puede observar en la Ilustración 5-2, hubo ciertas irregularidades durante el transcurso del ensayo. A las 60 horas con 4 minutos, hubo un corte de suministro eléctrico en la ciudad de Talca, que afectó el funcionamiento del equipo. Al detenerse, tanto la circulación del agua dentro del circuito y el funcionamiento del calderín, la potencia de inyección fue nula durante el corte, el cual tuvo una duración de 30 minutos.

Con el fin de corregir la baja generada por el corte de suministro eléctrico, para poder cumplir con la condición mencionada en la sección 4.4.1, sobre que la teoría del TRT considera que el equipo trabaja de forma ideal con una potencia constante, es que se extrajo el tramo de datos que corresponden a la duración de este corte y también los datos siguientes, hasta que la temperatura que se registra vuelve a ser la misma a la que estaba el circuito previo al corte de suministro eléctrico. Además, se quitan otras dos bajas, que ocurren por una disminución en el caudal. Los datos, luego de remover las fallas, quedan de la forma que se muestra en la Ilustración 5-3.

Ensayo N°1 - Registro Temperaturas TRT (corregido)

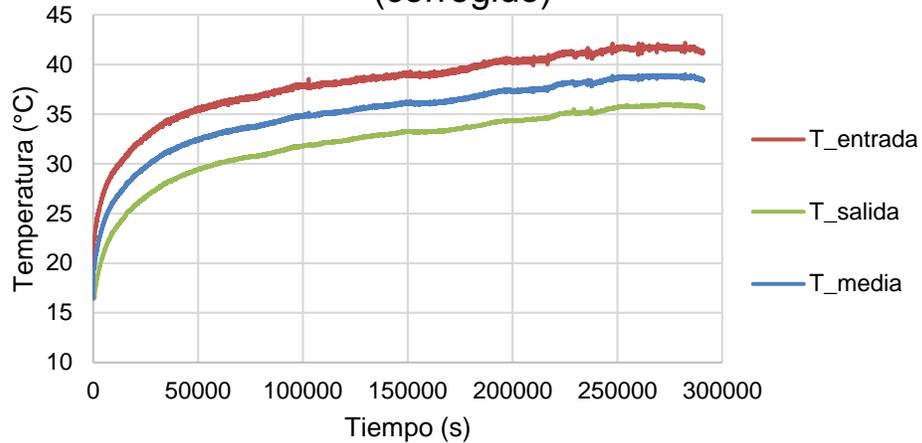


Ilustración 5-3: Gráfico temperaturas registradas por TRT durante el Ensayo N°1, luego de remover errores.

El ensayo N°1 corresponde al ensayo con mayor duración de todo el trabajo. Esto porque, además de analizar el enfriamiento del suelo posterior al ensayo, tiene como propósito poder entregarnos el valor in situ de la conductividad térmica del sondaje (λ). Para lograr este objetivo, es necesario esperar que el proceso se vuelva estacionario ya que como se mencionó en la sección 3.1.1, es necesario cumplir con esta condición para que las ecuaciones gobernantes en la teoría del TRT sean válidas. Por lo tanto, se considerará desde que la variación de temperatura de entrada como de salida al pozo, sea independiente del tiempo y, por ende, se mantengan constantes.

En la sección 3.1 sobre la teoría del TRT, se puede ver que su ecuación principal trabaja en base al logaritmo natural, por lo que se modifica la gráfica de la figura 12, usando el $\ln(t)$ en el eje x (Ilustración 5-4).

Ensayo N°1 - Registro de temperaturas TRT (corregido)

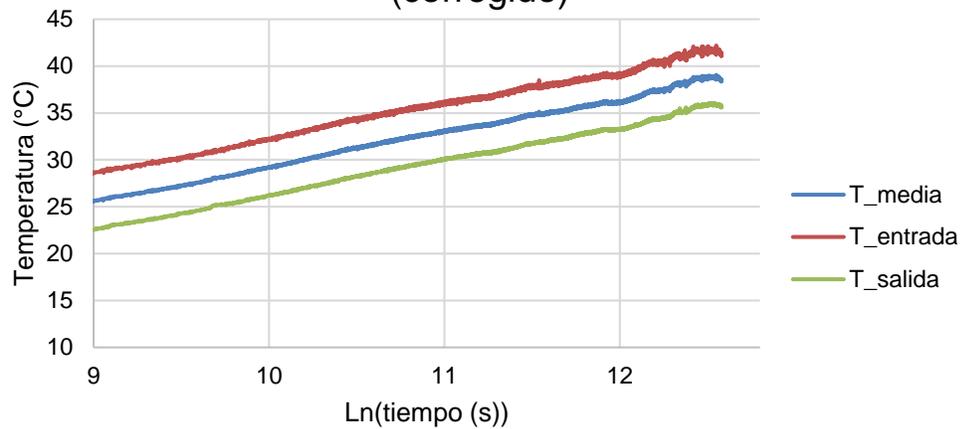


Ilustración 5-4: Gráfica registro de temperaturas TRT de Ensayo N°1 con Ln(t) como eje x.

Antes de utilizar las ecuaciones en las que se basa el TRT, es necesario cumplir con las condiciones expuestas en la sección Modelo de fuente lineal, ya que, al cumplir con éstas, nos aseguramos de que el error con el que se trabaje será menor a un 2%. La condición requerida para que esto se cumpla se expresa por la ecuación (6),

$$t > \left(\frac{20 r^2}{\alpha} \right)$$

Para efectos de este estudio, se considerará una difusividad térmica igual a $9,60 e^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$, basado en norma VDI 4640 para arenas saturadas, y el radio del pozo de estudio es igual a 0,07 [m]. Conociendo estos valores, se debe cumplir con que t debe ser mayor a 28,4 horas, lo que significa que, para calcular cualquier variable con los datos registrados por el TRT, es necesario descartar las primeras 28,4 horas de ensayo (Ilustración 5-5).

Ensayo N°1 - Temperatura media TRT (TD=28,4 h)

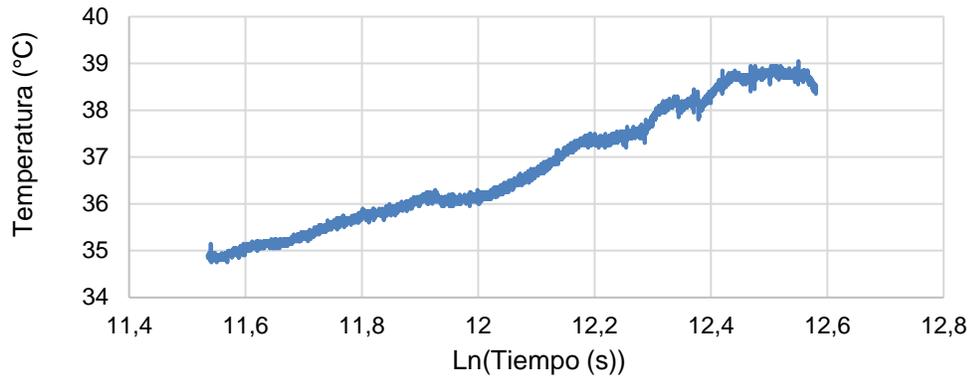


Ilustración 5-5: Gráfico registro de temperatura media en TRT, Ensayo N°1, TD= 28,4 horas.

Como se mencionó, el tiempo descartado (TD), que corresponde al intervalo de tiempo que se debe eliminar de la serie de datos, debe ser de al menos de 28,4 horas, para que las operaciones que se hagan utilizando esta curva, tengan un error menor a 2%. Teniendo esto en cuenta, debemos utilizar la ecuación (11) que nos relaciona la pendiente de la curva (m) con λ .

$$m = \frac{Q}{4 \pi L \lambda}$$

Para este ensayo tenemos que:

$$Q_{\text{promedio}} = 5044 \text{ [W]}.$$

$$L = 69 \text{ [m]}.$$

$$m = 4,2702$$

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, y despejando (λ), se obtiene un valor de $1,36 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$ para la conductividad térmica. Pero como se mencionó anteriormente, la teoría del TRT funciona cuando el proceso se vuelve estacionario, y como se puede observar en la Ilustración 5-3, el registro comienza a mostrar un proceso estacionario desde las 60 horas aproximadamente, por lo que, al utilizar un TD de 28,4 horas, no se cumpliría con este requisito.

Según información entregada en el informe oficial del proyecto, se tiene que la conductividad térmica teórica del terreno es de $2,4 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$. Este valor es

bastante mayor al obtenido con el análisis anterior, por lo que se analizará, si, variando el TD, varía el valor de (λ) y se asemeja al valor entregado por teoría.

Tiempo Descartado (TD) [horas]	Conductividad Térmica del Terreno (λ) [$W\ m^{-1}K^{-1}$]
28,4	1,36
40	1,21
50	1,29
60	1,65
65	2,37

Tabla 5-1: Resultados obtenidos de conductividad térmica considerando diferentes TD.

Realizado el ejercicio de ir variando el TD (ver Tabla 5-1), se puede observar que existe una gran diferencia en el valor de (λ) que se obtiene. Al considerar un TD igual a 65 horas, se obtiene un valor similar al entregado en el estudio técnico-teórico realizado para este proyecto, por lo que se considerará este valor como conductividad térmica efectiva del pozo.

Al apagar el TRT a las 93 horas, se libera la presión que existe en el circuito del equipo y las tuberías, para luego dejar esperar una hora para realizar el primer muestreo con el sensor de temperatura.

5.2.1.2 Ensayo N°1 – Sensor de Temperatura

El primer perfil de temperatura en profundidad se puede observar en color azul claro en la Ilustración 5-6. En la misma figura, se aprecian todas las pruebas realizadas posterior a haber apagado el TRT. La prueba 1 corresponde al perfil obtenido una hora después de apagar el TRT y desde la prueba 2 hasta la prueba 6, hay una diferencia de 2 horas entre cada prueba. Posterior a la prueba 7, se fueron tomando mediciones cada cierto tiempo, para ver la evolución de la temperatura del pozo hasta que ésta volviese a su normalidad, guiándonos por la temperatura no perturbada del subsuelo, medida al comienzo del estudio.

Ensayo N°1 - Perfiles de Temperaturas

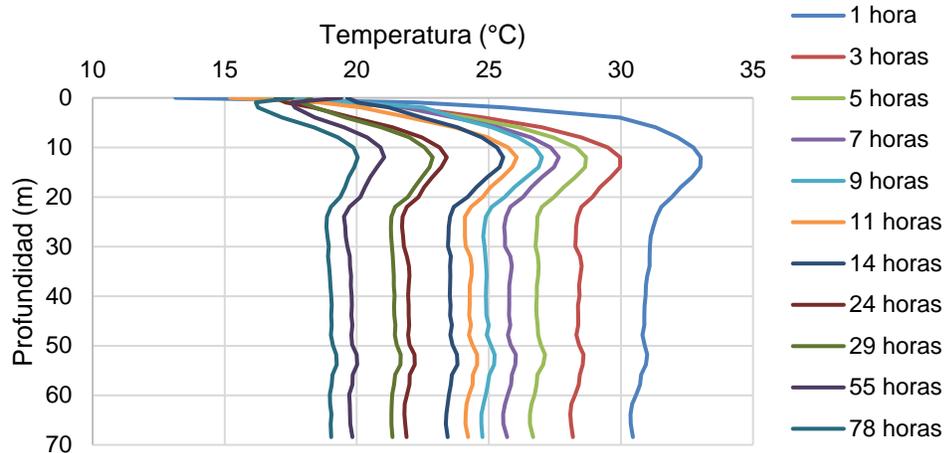


Ilustración 5-6: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura durante Ensayo N°1. Las horas corresponden al tiempo transcurrido desde que fue apagado el TRT.

Se puede observar en los perfiles de la Ilustración 5-6, que, desde los 14 metros aproximadamente, las curvas tienen una cierta simetría. Según lo mencionado en la sección 2.4, la temperatura del subsuelo es independiente de las condiciones ambientales en superficie a partir de pocos metros en profundidad. Según lo observado en esta gráfica, este subsuelo comienza a evidenciar esa independencia a partir de los 14 metros de profundidad. En la Ilustración 5-75.7 y Ilustración 5-8 se puede observar de mejor manera este fenómeno.

Perfiles de Temperatura entre 0 y 12 metros

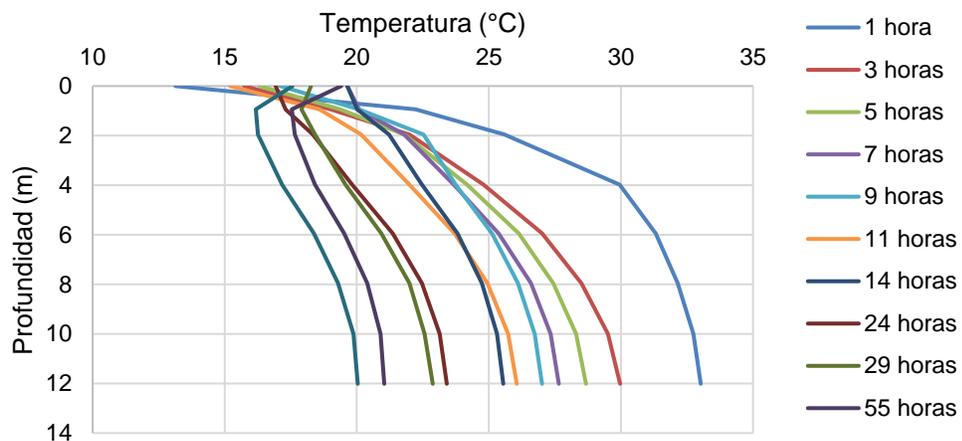


Ilustración 5-7: Perfiles de temperatura de pruebas correspondientes a Ensayo N°1 entre profundidades 0 y 12 metros.

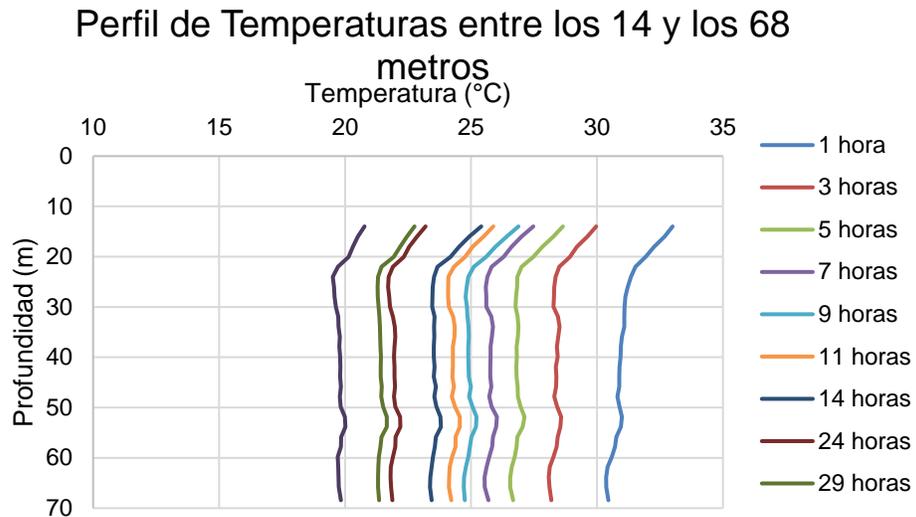


Ilustración 5-8: Perfiles de temperatura correspondientes a Ensayo N°1 entre profundidades 14 y 68 metros

En la Ilustración 5-7, se muestran los perfiles de temperatura hasta una profundidad de 12 metros. Se puede observar que mientras más cerca de la superficie se mide, el valor de temperatura del pozo se ve influenciado por las condiciones ambientales que pueda haber en ese momento. Las primeras pruebas se realizaron en días más bien fríos, con temperaturas que bordearon los 15°C y las últimas pruebas coincidieron con días más cálidos, teniendo temperaturas cercanas a los 20°C.

Debido a la independencia de las condiciones ambientales que se observan a partir de los 14 metros de profundidad, será desde esta profundidad que se asumirá que las temperaturas registradas corresponden a la temperatura del suelo en el punto más cercano al pozo, independientemente de las temperaturas que se registren en superficie.

Se puede observar que existen zonas en las que preponderan temperaturas mayores. Para efectos prácticos se calculará el promedio de las temperaturas desde los 14 a los 69 metros, el cual se considerará como la temperatura promedio del pozo en cada una de las pruebas realizadas con el sensor (Tabla 5-2). Utilizando este valor promedio, podemos graficar como varía la temperatura promedio del pozo en el tiempo, obteniendo la Ilustración 5-9.

Tiempo desde TRT off	Temperatura promedio del pozo (14-69 [m])
0	41,1
1 hora y 9 minutos	31,1
3 horas y 3 minutos	28,4
5 horas y 2 minutos	26,9
7 horas y 4 minutos	25,8
9 horas y 11 minutos	25,1
11 horas y 16 minutos	24,3
14 horas y 16 minutos	23,6
1 día y 16 minutos	21,9
1 día, 5 horas y 19 minutos	21,5
2 días, 7 horas y 1 minuto	19,8
3 días, 6 horas y 15 minutos	19,0

Tabla 5-2: Resumen de pruebas realizadas con el sensor de temperatura. La columna 1 muestra el tiempo transcurrido desde que el TRT fue apagado y columna 2 muestra la temperatura promedio del pozo de estudio considerando desde los 14 a los 69 [m] de profundidad.

Ensayo N°1 - Variación temperatura en Pozo de estudio (desde TRT Off)

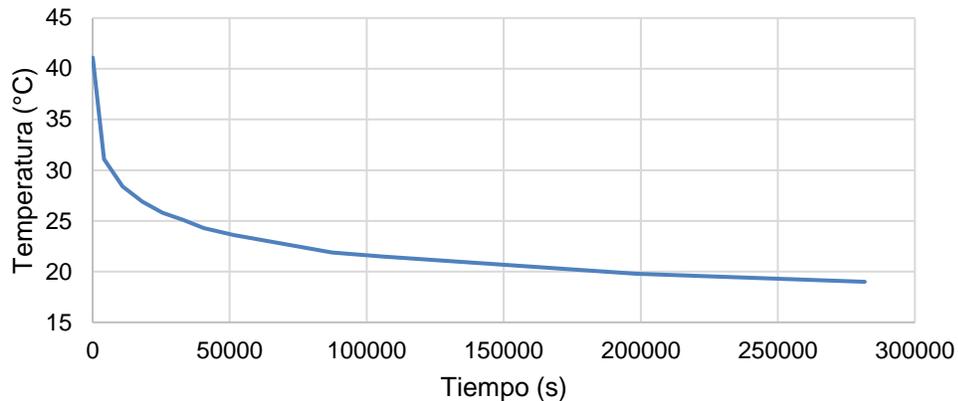


Ilustración 5-9: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°1.

Mediante el software Excel, se puede calcular la línea de tendencia de manera automática, que es la curva que mejor representa a la serie de datos (curva roja segmentada en Ilustración 5-10).

Ensayo N°1 - Variación temperatura en Pozo de estudio (desde TRT Off)

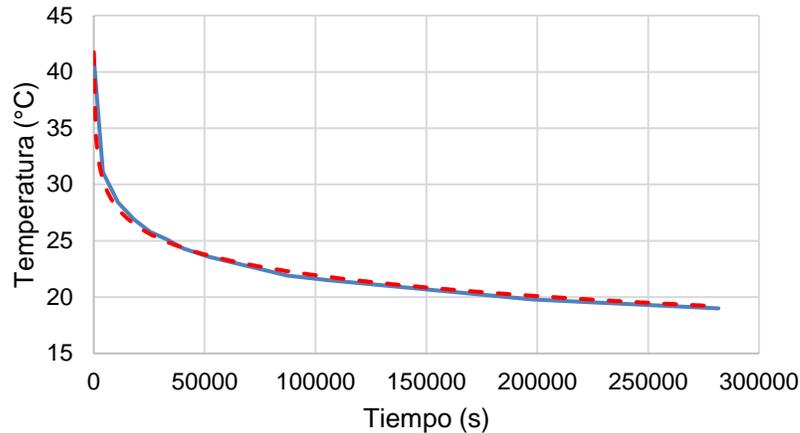


Ilustración 5-10: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento luego de apagar el TRT. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°1; curva roja segmentada: línea de tendencia calculada por Excel.

Utilizando esta herramienta, se obtiene que la ecuación de la línea de tendencia que más se aproxima a la curva de datos es de tipo logarítmica y se expresa como:

$$T(t) = -2,67 \ln t + 52,6$$

donde el término que acompaña al $\ln(t)$ es la pendiente de la curva logarítmica y se relaciona con la conductividad térmica del sistema.

Al graficar la variación de temperatura del pozo de estudio utilizando el logaritmo natural del tiempo en el eje de las abscisas, se obtiene una curva que se aproxima a una recta, para la cual su línea de tendencia es de carácter lineal, como se puede ver en la Ilustración 5-11, teniendo como ecuación,

$$T(t) = -2,67 t + 52,6$$

Ensayo N°1: Variación de temperatura en pozo de estudio.

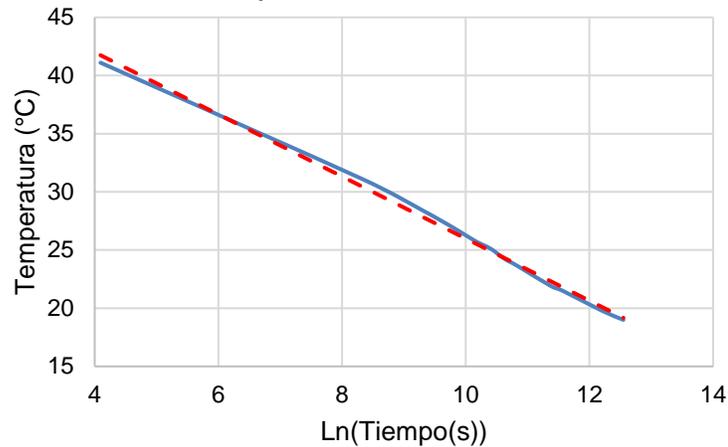


Ilustración 5-11: Gráfica de variación de temperaturas del pozo de estudio, en proceso de enfriamiento, usando el $\ln(t)$ en el eje x.

En los siguientes ensayos, no se realizará el cálculo de conductividad térmica, por lo que se detallará solamente la sección sobre enfriamiento.

5.2.2 Ensayo 2

5.2.2.1 Ensayo N°2 – TRT

El segundo ensayo se llevó a cabo durante los días 3 y 6 de septiembre del 2018 y tuvo una duración de 68 horas y 9 minutos. En la Ilustración 5-12, se puede observar el registro completo de temperaturas obtenido por el Test de Respuesta Térmica durante el ensayo N°2.

Ensayo N°2 - Registro de Temperaturas TRT

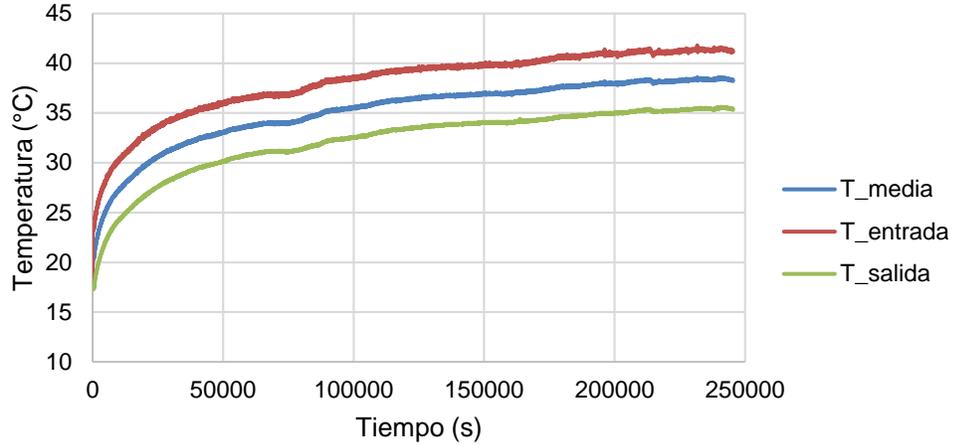


Ilustración 5-12: Registro de temperaturas de TRT durante ensayo N°2

Al igual que en el ensayo N°1, al momento de apagar el equipo, el último registro que se tiene de la temperatura de entrada al pozo (T_{entrada}) fue de 41,1°C, la que se asumirá como la T° promedio del pozo y será utilizada como la temperatura desde la cuál éste se comienza a enfriar.

5.2.2.2 Ensayo N°2 – Sensor de temperatura.

Luego de apagar el TRT, se comienza con las pruebas usando el sensor de temperatura, al igual que en el ensayo N°1. Se obtienen los siguientes perfiles de temperatura en profundidad (Ilustración 5-13).

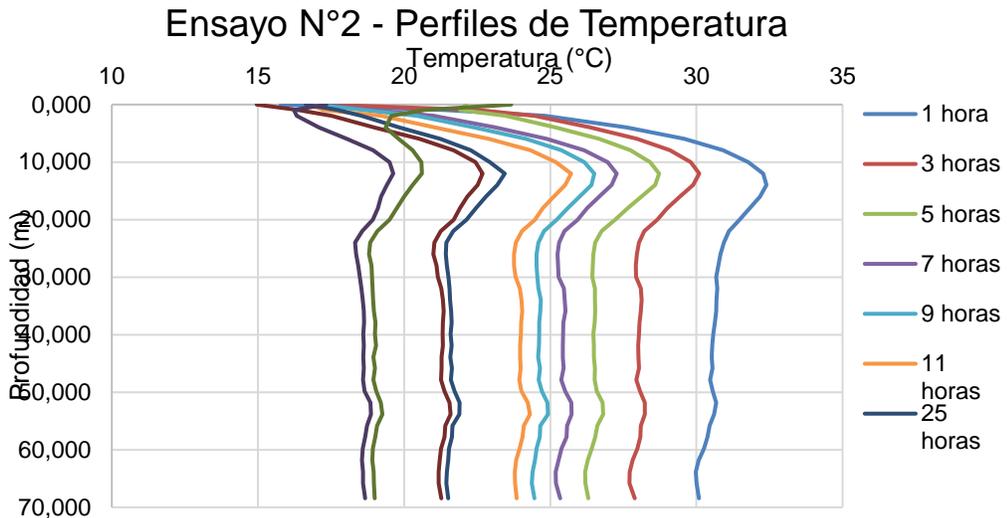


Ilustración 5-13: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura durante Ensayo N°2.

Al calcular el valor promedio de temperatura en cada uno de los ensayos, se puede obtener la curva de cómo evoluciona esta temperatura en el tiempo (Ilustración 5-14).

Ensayo N°2 - Variación de temperatura en pozo de estudio (desde TRT Off).

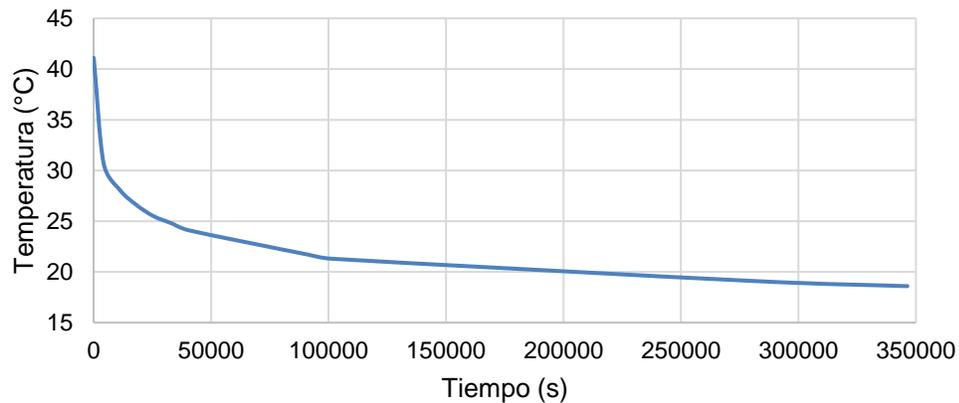


Ilustración 5-14: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°2.

Calculando la curva teórica de la misma forma que en el Ensayo N°1, Excel nos entrega una ecuación de la forma:

$$T(t) = -2,65 \ln t + 52,3$$

Esta curva se puede ver representada en la Ilustración 5-15 como una curva roja segmentada.

Ensayo N°2 - Variación de temperatura en pozo de estudio (desde TRT Off).

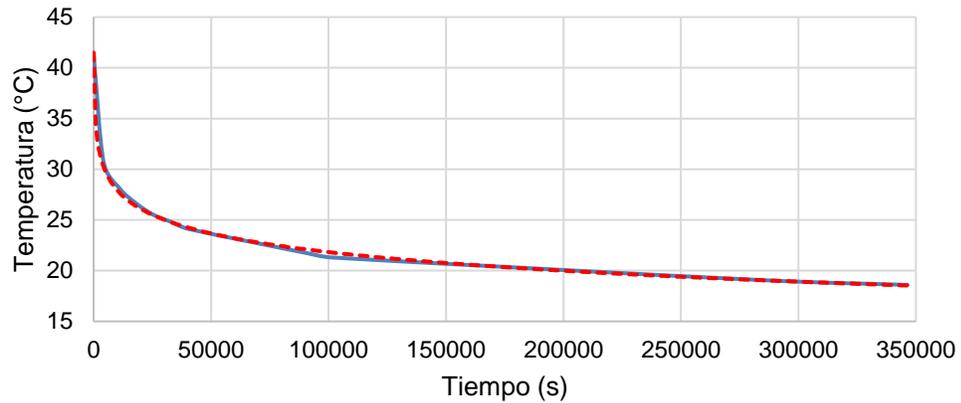


Ilustración 5-15: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°2; curva roja segmentada: línea de tendencia que más se aproxima a la curva de datos reales calculada de forma automática por Excel.

5.2.3 Ensayo 3

5.2.3.1 Ensayo N°3 – TRT

El tercer ensayo se realizó durante los días 10 y 11 de septiembre del 2018 y tuvo una duración de 2 horas. En la Ilustración 5-16, se puede observar el registro completo de temperaturas obtenido por el Test de Respuesta Térmica durante el ensayo N°3.

Ensayo N°3 - Registro de Temperaturas TRT

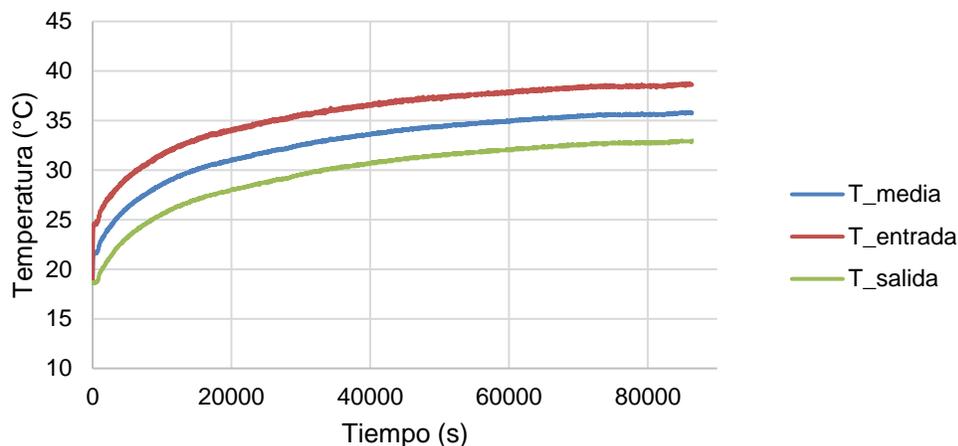


Ilustración 5-16: Registro de temperaturas de TRT durante ensayo N°3.

Al ser este ensayo de mucho menor duración que los anteriores (solo 25 horas, en comparación a las 93 y 68 horas de los ensayos previos), al momento de apagar el equipo, el último registro temperatura de entrada al pozo (T_{entrada}) fue de $38,6^{\circ}\text{C}$, la que se asumirá como la T° promedio del pozo y será utilizada como la temperatura desde la cuál éste se comienza a enfriar.

5.2.3.2 Ensayo N°3 – Sensor de temperatura.

Luego de apagar el TRT, se comienza con las pruebas usando el sensor de temperatura, al igual que en los ensayos anteriores. Se obtienen los siguientes perfiles de temperatura en profundidad (Ilustración 5-17).

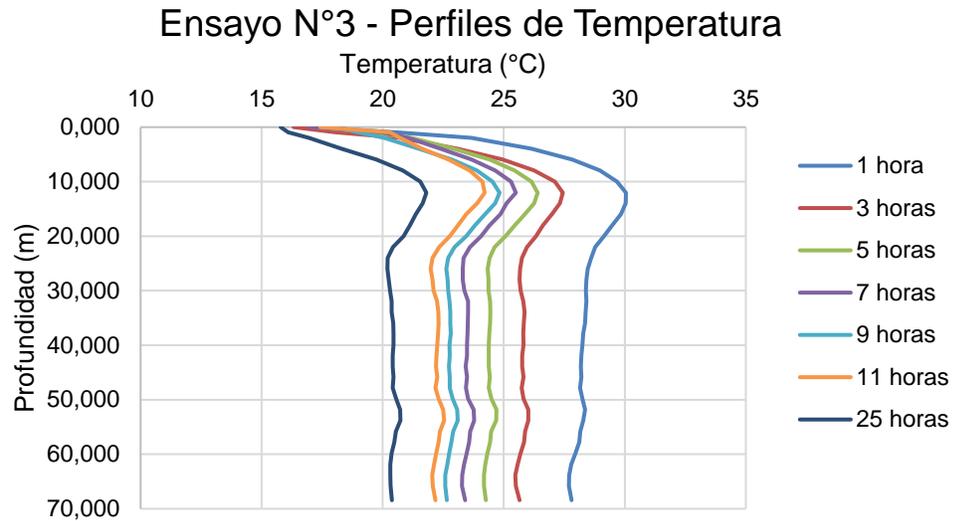


Ilustración 5-17: Perfiles de temperatura en profundidad obtenidos con el sensor de temperatura (Level Troll 400). Ensayo N°3

Al calcular el valor promedio de temperatura en cada uno de los ensayos, se puede obtener la curva de cómo evoluciona esta temperatura en el tiempo (Ilustración 5-18).

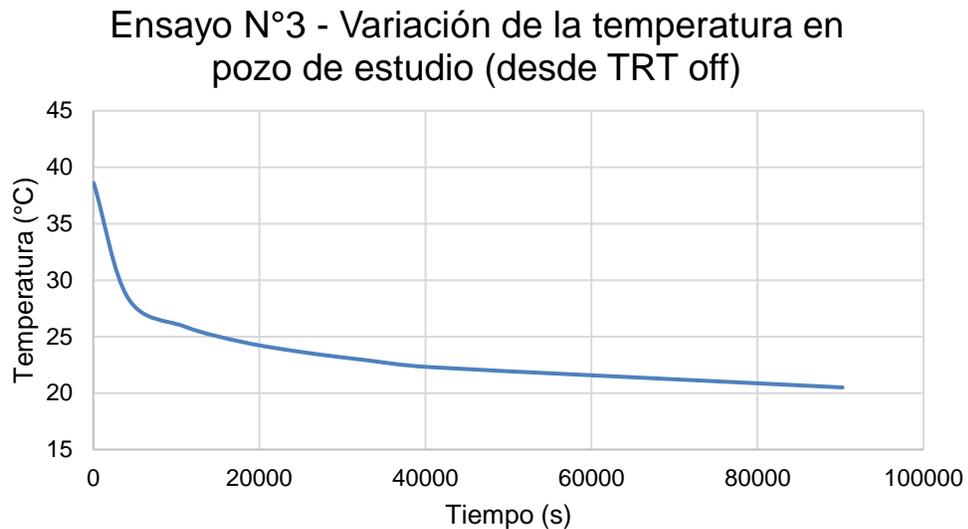


Ilustración 5-18: Variación temperatura promedio del pozo de estudio, luego de haber apagado el TRT. Corresponde a Ensayo N°3.

Calculando la línea de tendencia al igual que en los ensayos anterior, Excel nos entrega una ecuación de la forma:

$$T(t) = -2,49 \ln t + 48,9$$

Esta curva se ve representada como una curva roja segmentada en la Ilustración 5-19.

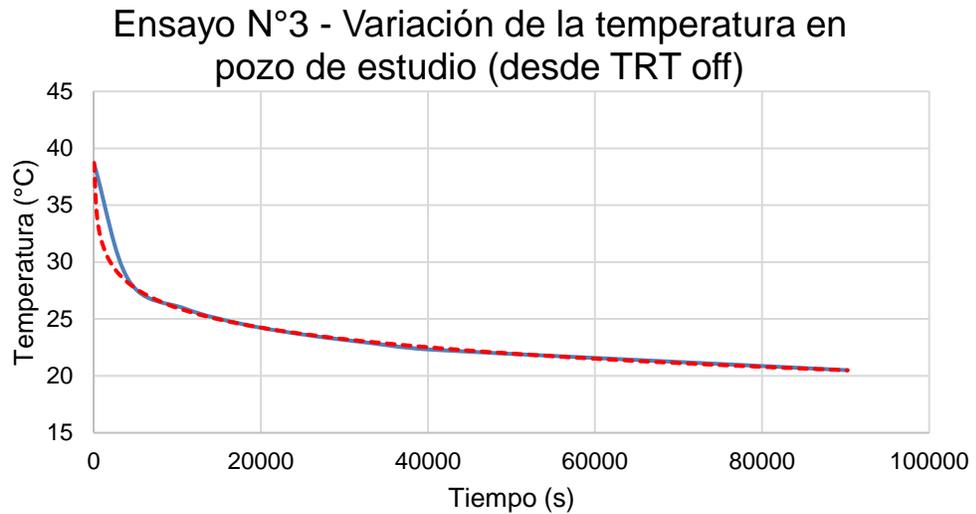


Ilustración 5-19: Gráfico de temperaturas promedio del pozo en proceso de enfriamiento. Curva azul: datos obtenidos en Ensayo N°3; curva roja segmentada: línea de tendencia que más se aproxima a la curva de datos reales calculada de forma automática por Excel.

Capítulo 6

6 Análisis teórico

A continuación, el objetivo será realizar un análisis teórico de cómo sería la curva de enfriamiento del pozo en estudio, utilizando las ecuaciones mostradas en la sección 3.1.1 y 3.3.

En este capítulo se trabajará para cumplir con los objetivos específicos, los cuales tienen un enfoque más teórico, que son formular una curva teórica de temperaturas promedio de un pozo geotérmico en función del tiempo y analizar la disminución de temperaturas en un pozo, en función de sus propiedades térmicas y las del subsuelo que lo rodea.

Por información entregada en el proyecto del Edificio Parque Tecnológico (Castro, Pascual, & Indacochea, 2012), se tiene conocimiento de las dimensiones y algunas propiedades térmicas del sistema geotérmico en estudio, que involucra las tuberías utilizadas, el relleno del pozo y el terreno involucrado en la transferencia de calor, generada por las diferencias de temperatura. Dichas magnitudes se pueden ver en la Tabla 6-1.

	Espesor [m]	Conductividad Térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Tubería	0,0029	0,5
Relleno (mortero)	0,019	1,64*
Terreno	0,5**	2,4

Tabla 6-1: Resumen características de capas involucradas en la transferencia de calor entre el fluido caloportador y el terreno.

*La conductividad térmica del relleno del pozo se obtuvo a partir de los datos entregados por el informe del proyecto donde se mencionan a partir de qué componentes se obtuvo el relleno utilizado (Castro, Pascual, & Indacochea, 2012). Para este pozo se utilizó cemento (27,5%), arena sílice (55,1%), superplastificante (0,5%), bentonita (1,1%) y agua (15,7%). Considerando la conductividad térmica de cada uno de estos materiales y la proporción correspondiente a cada uno de ellos en el relleno, se obtiene una conductividad térmica del relleno igual a 1,64 [W m⁻¹K⁻¹].

**El valor que se le atribuye al “espesor” del terreno es aproximado, ya que hay muy pocos estudios acerca de esta variable. Se basará en un modelo presentado en (Zenteno Arenas, 2013). Al no tener disponible el modelo utilizado en este trabajo, se hará una aproximación del valor que correspondería para este estudio.

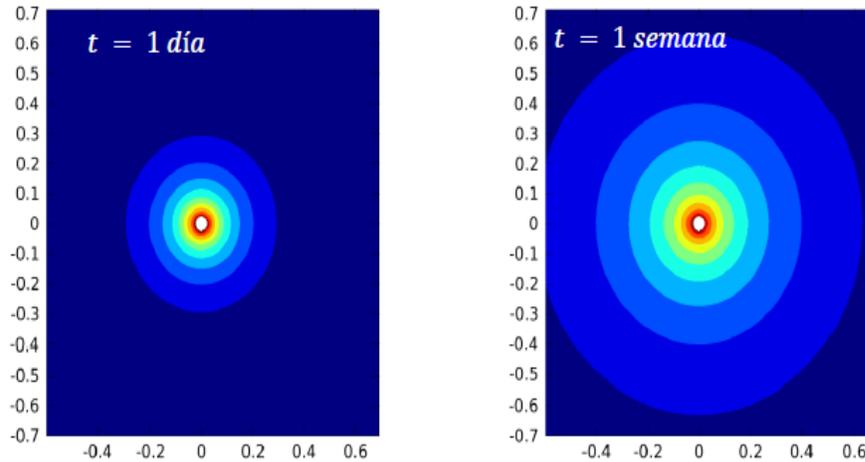


Ilustración 6-1: Perfiles de temperatura alrededor de una tubería en diferentes instantes. (Zenteno Arenas, 2013)

En la Ilustración 6-1, se muestran los perfiles de temperatura obtenidos en el modelo mencionado (Zenteno Arenas, 2013). En la figura, el centro de la tubería se encuentra a una temperatura de 24 °C (color rojo) y el terreno, con temperatura no perturbada, se muestra con el color azul oscuro, que corresponde a 14°C.

En el estudio en curso, el ensayo N°1, que fue el de mayor duración, fue de 93 horas, por lo que no alcanzó a ser 4 días y la temperatura del centro es de 41°C, por lo que la distancia hasta donde la temperatura del suelo se ve perturbada puede ser diferente a la mostrada en la Ilustración 6-1. Para este caso, se tienen datos reales de cómo es el proceso de enfriamiento del pozo, por lo que se analizará con qué valor de espesor de terreno, involucrado en la transferencia de calor, se obtiene un error cuadrático medio menor entre la curva teórica de enfriamiento que se obtenga y la curva de datos reales. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 6-2.

Espesor terreno [m]	Pendiente obtenida	Error cuadrático medio
0,4	-2,76	3,62
0,5	-2,63	2,31
0,6	-2,53	1,36
0,7	-2,4	0,70
0,8	-2,38	0,77
0,9	-2,33	1,11

Tabla 6-2: Error cuadrático medio entre serie de datos y curva teórica generada variando espesor de terreno considerado.

Se puede observar que para un espesor de 0,7 m se obtiene el error cuadrático medio más pequeño, pero si consideramos solo la pendiente, la cual se calcula utilizando la ecuación (16) y posteriormente la ecuación (11), teniendo en cuenta que en el ensayo N°1, la pendiente de la línea de tendencia que mejor representa la curva de datos fue de 2,67, se debe notar que el espesor que genera una pendiente similar a ésta, es de 0,5 m, por lo que ese valor será la distancia considerada entre el borde externo del relleno y el punto del subsuelo en que la temperatura se mantiene sin perturbaciones.

Es importante destacar que, para realizar este análisis, se asumirán como conocidos los valores de algunas variables (ver Tabla 6-3). En el caso de la resistividad, se utilizará el valor obtenido en el ensayo N°1 de TRT pero que también se pueden encontrar en la teoría.

Variable	Valor utilizado
Conductividad térmica del sistema	2,36 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Difusividad térmica del terreno	9,6 · 10 ⁻⁷ [$\frac{m^2}{s}$]
Resistividad térmica de sistema	0,15 [m K W ⁻¹]

Tabla 6-3: Valores atribuidos a variables térmicas del terreno para el análisis de su enfriamiento.

La conductividad térmica del sistema mostrada en la Tabla 6-3, se calcula utilizando los valores mostrados en la Tabla 6-1, considerando las proporciones en la que influye cada componente (tubería, relleno y terreno) y los valores de conductividad térmica de cada uno de ellos.

6.1 Curva teórica del proceso de enfriamiento del pozo.

Como se mencionó en la sección 3.3, en este estudio, el flujo de transferencia de calor radial ocurre en tres capas, siendo la primera capa, la que corresponde al espesor de la tubería, que cumple el rol de intercambiador de calor del sistema; la segunda capa corresponde al espesor del relleno utilizado en este pozo; la tercera capa corresponde al espesor de terreno desde el punto que limita con el borde del pozo (borde externo del relleno) hasta el punto en el que su temperatura no se ve perturbada por los cambios de temperatura ocurridos en el pozo. El resumen de las características de las capas involucradas en la transferencia de calor se puede ver en la Tabla 6-1.

Teniendo estos valores, se deben asociar a las variables que considera la ecuación de transferencia de calor para un sistema radial de tres capas cilíndricas, mencionada en la sección 3.3 de este trabajo.

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\left(\frac{1}{\lambda_a}\right) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_b}\right) \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_c}\right) \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}$$

Donde, para este estudio, se definen como,

q : flujo de calor entre el fluido caloportador (agua en la tubería) y el terreno (W).

T_1 : Temperatura media del pozo (borde interno de la tubería) [°C o K].

T_4 : Temperatura del terreno sin perturbar [°C o K].

L : Largo de la tubería. [m]

λ_a : Conductividad térmica de la tubería. [W m⁻¹K⁻¹]

λ_b : Conductividad térmica del relleno utilizado en el pozo de estudio. [W m⁻¹K⁻¹]

λ_c : Conductividad térmica del terreno. [W m⁻¹K⁻¹]

r_1 : Radio interno de la tubería. [m]

r_2 : Radio externo de la tubería. [m]

r_3 : Radio que corresponde a distancia desde centro tubería hasta borde externo del relleno. [m]

r_4 : Radio que corresponde a la distancia desde centro de la tubería hasta punto donde el terreno mantiene su temperatura sin perturbar.

Los valores que corresponden al estudio realizado se resumen en la Tabla 6-4.

Variable	Valor utilizado
L	69 [m]
T_1	41,1 [°C]
T_4	16 [°C]
λ_a	0,5 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_b	1,64 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_c	2,4 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
r_1	0,0131 [m]
r_2	0,016 [m]
r_3	0,035 [m]
r_4	0,535 [m]

Tabla 6-4: Valores atribuidos a variables de la ecuación (16) de flujo de calor en el sistema

Al tener todos los valores correspondientes a la ecuación (16), se obtiene el flujo de calor teórico en el sistema igual a,

$$Q = 5,383 \text{ [W]}.$$

Se puede asumir el valor obtenido de flujo de calor como un valor negativo, ya que el calor en cuestión fluye desde el sistema (pozo geotérmico) hacia el medio externo que lo rodea, que en este caso es el subsuelo.

Si reemplazamos este valor en la ecuación (11), se obtiene,

$$m = \frac{Q}{4 \pi L \lambda} = \frac{-5,383}{4 \cdot 3,1415 \cdot 69 \cdot 2,36} = -2,63$$

Luego, utilizando la ecuación (12), podemos calcular cual sería el coeficiente de posición en la curva teórica que se está calculando, obteniendo un valor,

$$c = 49,68$$

Es importante mencionar que el T_0 utilizado se consideró como la temperatura a la que se encuentra el pozo desde el momento que se comienza con las mediciones. Es decir, la última temperatura registrada por el TRT.

El coeficiente de posición c es, por definición, el valor de la ordenada en el origen, pero si observamos la ecuación, tenemos que el flujo de calor q , debería ser 0 para que el valor de c fuese igual a la temperatura inicial T_0 . En este caso, existe una diferencia entre el T_0 considerado y la temperatura sin perturbar del suelo, por lo que existe una transferencia de calor desde un comienzo, ya que el sistema no está aislado. Es por esta razón que el coeficiente de posición no es representativo. Además, por el método de medición utilizado, no se tiene precisión de lo que ocurre con la temperatura del pozo durante la primera hora transcurrida desde que el TRT se apaga, por lo que no se tiene certeza de que la temperatura inicial del sistema considerada (41,1°C) sea la real.

Si comparamos con las líneas de tendencia obtenidas a partir de las mediciones, se escribirá la ecuación teórica considerando el eje de las abscisas como el $\text{Ln}(t)$. La ecuación de la curva obtenida de forma teórica es de la forma,

$$T(t) = -2,63 \text{ Ln}(t) + 49,68$$

Al graficar esta curva utilizando los mismos instantes de tiempo que en los ensayos prácticos se obtiene la gráfica mostrada en la Ilustración 6-2.

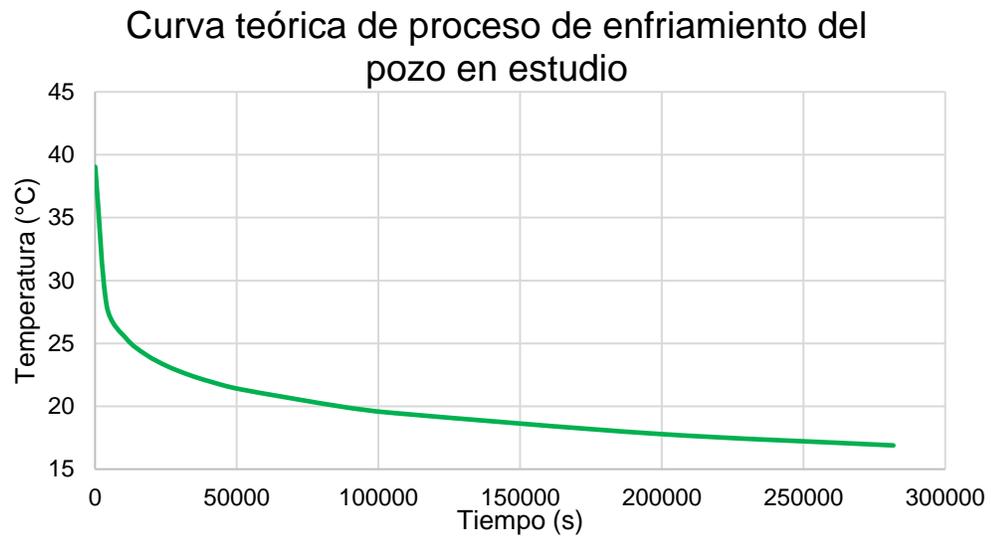


Ilustración 6-2: Curva obtenida utilizando teoría y valores conocidos de conductividad, difusividad y resistividad térmica del terreno.

Terminado esto, en la sección 7 se comparará este resultado, con las curvas obtenidas a partir de los ensayos prácticos y se analizará qué tanto se asemeja esta curva teórica, a las obtenidas por mediciones.

Capítulo 7

7 Interpretación: discusión sobre resultados y metodología

7.1 Curva de tendencia en ensayos prácticos.

En la sección 5.2, se mostraron los resultados obtenidos en los diversos ensayos prácticos que se realizaron en el pozo de estudio.

Como el objetivo de este trabajo es el análisis del enfriamiento de un pozo geotérmico y su relación con las resistencias térmicas presentes en él, el análisis se enfocará en las curvas de temperatura promedio del pozo obtenidas en función del tiempo, tanto las calculadas de forma práctica como teórica. Estas curvas, muestran cómo se va enfriando el pozo desde que deja recibir una potencia calorífica constante.

Se calculó las curvas de tendencia para cada una de las curvas de datos. Los parámetros de estas curvas se muestran resumidos en la Tabla 7-1.

N° Ensayo	Línea de tendencia	m	c	R ²
Ensayo 1	$T(t) = -2,67 \ln(t) + 52,67$	-2,67	52,67	0,9954
Ensayo 2	$T(t) = -2,65 \ln(t) + 52,34$	-2,65	52,34	0,9973
Ensayo 3	$T(t) = -2,49 \ln(t) + 48,91$	-2,491	48,91	0,9993

Tabla 7-1: Resumen de curvas de tendencias obtenidas a partir de los datos prácticos. m: pendiente de la recta; c: coeficiente de posición; R²: coeficiente de determinación, para mostrar que tanto se ajusta la curva de tendencia a los datos.

Para los tres ensayos, líneas de tendencia logarítmicas son las que más se ajustan a la curva de datos y entregan un R² muy cercano a 1.

Al tener la curva teórica, en función del tiempo, del proceso de enfriamiento de un pozo geotérmico, calculada ocupando las características y propiedades del pozo de estudio utilizado en este trabajo, se hará una comparación con las curvas de enfriamiento del pozo, obtenidas de manera práctica (sección 5.2).

Curvas práctica y teórica del proceso de enfriamiento del sistema geotérmico

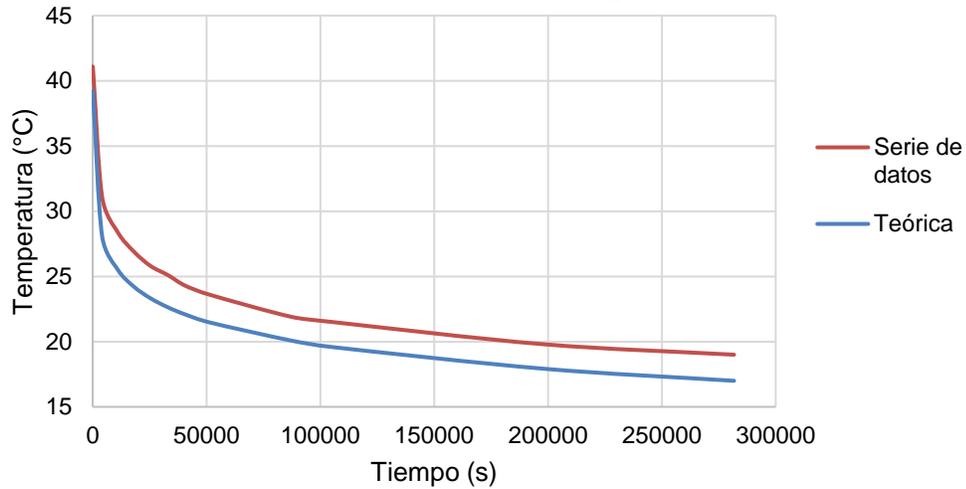


Ilustración 7-1: Curvas de proceso de enfriamiento de un pozo geotérmico. Curva roja: obtenida a partir de las mediciones realizadas durante ensayo N°1. Curva azul: obtenida a partir de la teoría.

En la Ilustración 7-1, se pueden observar las curvas obtenidas de forma teórica y práctica. La Tabla 7-2 muestra las ecuaciones que describen estas curvas. Si bien tienen una cierta similitud en su forma, tienen diferencias que se deben analizar.

	Ecuación
Curva teórica	$T(t) = -2,63 \ln(t) + 49,68$
Curva práctica (Ensayo N°1)	$T(t) = -2,67 \ln(t) + 52,6$

Tabla 7-2: Ecuaciones de curvas del proceso de enfriamiento.

7.2 Pendiente

La pendiente obtenida para ambas curvas es muy similar. Se debe mencionar que ciertos valores como, por ejemplo, la distancia que hay desde el centro de la tubería hasta la zona del subsuelo donde su temperatura no cambia, son determinantes para entregar una curva similar a la obtenida a partir de las mediciones.

Otro punto es que, las ecuaciones que se utilizaron para obtener esta curva, consideran un estado estacionario, lo cual no es el caso para el enfriamiento de un pozo, ya que la temperatura no es independiente del tiempo. A pesar de esta

suposición, se obtiene una aproximación bastante buena de la pendiente con la que la temperatura irá decayendo.

7.3 Coeficiente de posición

Para este coeficiente, los resultados teóricos obtenidos son un poco más imprecisos, ya que para obtener el valor de la curva teórica que se muestra en la Tabla 7-2, se debió considerar como temperatura T_0 , la temperatura inicial del pozo en el proceso de enfriamiento, es decir, la última temperatura que fue registrada en el TRT antes de que éste se apagara. Esta temperatura corresponde a la que tiene el fluido cuando va ingresando al pozo, pero no necesariamente representa la temperatura promedio de todo el pozo en estudio, ya que parte de ese calor se transfiere hacia el subsuelo que rodea el sondeo.

Al no coincidir los coeficientes de posición de la curva teórica con la curva práctica, la curva teórica se emplaza un par de valores más abajo en cuanto a la temperatura se refiere, por lo que a pesar de que ambas tienen una condición inicial de temperatura igual a 41°C , la curva teórica modela el proceso de enfriamiento con un gradiente mayor, es decir, muestra una mayor disminución de temperatura en un intervalo de tiempo más acotado.

Para un próximo estudio, se recomendaría que se hiciera un perfil de temperatura inmediatamente después de que se apagara el TRT, ya que la temperatura que registra el TRT no es necesariamente la temperatura promedio del pozo. Si bien la curva que entregaría esta medición no mostraría la diferencia en temperaturas a distintas profundidades, podría entregar el valor promedio de temperatura del pozo en el instante que deja de recibir la potencia calorífica de parte del TRT. De esta manera se podría tener un registro continuo de lo que pasa con la temperatura del fluido, una vez apagado el equipo.

Capítulo 8

8 Conclusiones

De acuerdo con lo mencionado en la sección 1.1 sobre los objetivos de este trabajo, se puede concluir que tanto el objetivo general como los específicos se cumplieron de buena manera. En cuanto a los objetivos específicos, se puede concluir que:

- Se obtuvo un valor in situ de conductividad térmica efectiva del intercambiador vertical geotérmico en estudio igual a $2,37 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$. Este valor es muy aproximado al valor entregado por la teoría, por lo que se puede asumir el buen funcionamiento del equipo TRT como del uso de éste. En la tabla Tabla 5-1, se puede ver la alta dependencia del valor de la conductividad con el Tiempo Descartado (TD) con el que se trabaje por lo que considerar desde que el proceso se vuelva estacionario es fundamental para obtener un valor correcto de conductividad efectiva del pozo.
- Se obtuvo tres curvas de datos de temperatura promedio del pozo geotérmico en estudio, las cuales, a pesar de comenzar con temperaturas iniciales diferentes, conservan la misma forma de la curva, tendiendo a una correlación logarítmica con el tiempo transcurrido, por lo que se puede concluir que si bien durante las 5 primeras horas, la variación de temperatura promedio del pozo es bastante abrupta, en las horas y días siguientes este cambio se va haciendo cada vez más tenue, lo que evidencia la estabilidad del subsuelo y su alta capacidad térmica.
- Utilizando datos teóricos y ecuaciones conocidas en el estudio de transferencia de calor, se puede calcular una curva teórica que representa bastante bien lo que ocurre en la realidad, lo que se pudo comprobar al comparar las curvas de datos reales con la obtenida por teoría. Esto a pesar de que se utilizan ecuaciones para procesos estacionarios.
- Se recalca la importancia de considerar todos los componentes del pozo geotérmico para realizar el estudio teórico. Es decir, la consideración de las propiedades físicas tanto de las tuberías utilizadas, del relleno estabilizador del pozo y del terreno en el que se está trabajando, es fundamental para la realización de un buen análisis en lo que al pozo en general respecta, ya que, tanto los datos obtenidos por el TRT y los obtenidos por el sensor de temperatura, evidencian propiedades del pozo como un sistema completo, no solamente del terreno en cuestión.

A nivel general se concluye que, con la utilización del Test de Respuesta Térmica y de un sensor de temperatura, es posible analizar el comportamiento del subsuelo durante su proceso de enfriamiento. A partir de los tres ensayos realizados y el análisis teórico puesto en práctica, se puede observar que el

comportamiento del subsuelo, para conseguir volver a su temperatura de equilibrio, tiene una correlación logarítmica con el tiempo. Durante las primeras 7 horas, la temperatura disminuye de forma abrupta, lo que se observa a través de una gran pendiente, pero en las horas siguientes, la pendiente va disminuyendo cada vez más, por lo que toma varios días (dos semanas, aproximadamente) volver nuevamente a su temperatura de equilibrio. Esto pone en evidencia la gran capacidad calorífica del subsuelo, por lo que puede ser considerada una fuente de energía renovable, limpia y estable mientras se utilice de forma correcta.

9 Bibliografía

- Acosta, A. (2011). *La crisis energética y las energías alternativas*. Bogotá.
- Aiguasol. (2016). *Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile*. Santiago.
- Álvarez Pelegry, E., Larrea Bastera, M., & Suárez Diez, C. (2017). *Energías renovables en calefacción y refrigeración en los sectores residencial y terciario*. Bilbao: Cuadernos Orkestra.
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2012). *Guía técnica: Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. UK: Holymoor Consultancy Ltd.
- Beier, R. (2012). Vertical temperature profiles and borehole resistance in a U-tube borehole heat exchanger. *Geothermics*, 23-32.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press.
- Casanova Pelaez, P., Palomar Carnicero, J., Lopez Garcia, R., & Cruz Peragon, F. (2014). Desarrollo de equipo para la realización de test de respuesta térmica del terreno (TRT) en instalaciones geotérmicas. *Revista DYNA*, 316-324.
- Castro, D., Pascual, P., & Indacochea, I. (2012). *Proyecto de aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en edificio de usos múltiples. Parque Tecnológico. Tomo II: Campo de Sondas*. Talca: Universidad Católica del Maule.
- del Valle Fernández, P. (2012). *Uso conjunto de diagráffas y TRT para la determinación de parámetros térmicos de un sondeo*. Oviedo: Repositorio Institucional Universidad de Oviedo.
- Eklöf, C., & Gehlin, S. (1996). *A mobile Equipment for Thermal Response Test*. Lulea: S.E.A.
- Espada Serrano, V. (2012). *Estudio de instalaciones de climatización geotérmicas en viviendas*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Fernández Bellver, P. (2013). *Determinación de la influencia del terreno en la valoración técnica y económica de la instalación geotérmica mediante*

- software EED y GEO2*. Granada: Agencia Provincial de la Energía de Granada.
- Jara Morales, L., & Martínez Martínez, M. (2016). *Guía técnico-económica para la construcción de sistemas de climatización geotérmica aplicado a viviendas unifamiliares*. Talca: Universidad Católica del Maule.
- Ji, B. (2015). *Disipación del calor en un sistema geotérmico de baja entalpía*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- LLopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid.
- Lund , J., & Sanner, B. (2004). Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps - A World Overview. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol.25, No. 3 1-10.
- Monzó, P. (2011). *Comparison of different Line Source Model approaches for analysis of Thermal Response Test in a U-pipe Borehole Heat Exchanger*. Estocolmo.
- Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency . (2004). *Heating and cooling with a heat pump*. Canada: EnerGuide.
- Pitts, D., & Sissom, L. (2011). *Theory and Problems of Heat Transfer*. McGraw-Hill Education.
- Rivas, R. M. (2016). *Construye 2020: Instalaciones de geotermia*. Madrid, España: Fundación Laboral de la Construcción.
- Romero Ramos, N. (2011). *Consumo de energía a nivel residencial en Chile y análisis de eficiencia energética en calefacción*. Santiago: Universidad de Chile.
- Sharqawy, M. (2009). First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 2218-2223.
- Yu, Y., & Olson, G. (2018). *Ground Source Heat Pump Systems*. Berlin: Springer.
- Zenteno Arenas, A. (2013). *Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Anexos

Anexo 1: Test de Respuesta Térmica (TRT)

Los principales elementos componentes del circuito hidráulico del equipo TRT se describen a continuación:

- 1.- Válvula de corte en la entrada, sirve para cerrar el flujo de agua a la entrada
- 2.- Sonda de temperatura de retorno, mide la temperatura del agua de retorno del pozo
- 3.- Presostato de seguridad, corta el funcionamiento del equipo en caso de: falta de presión de agua (menor a 1 bar) y exceso de presión de agua (mayor a 4 bar)
- 4.- Vaso de expansión, recoge el aumento de volumen de agua que se produce al calentar el circuito.
- 5.- Calderín, aloja las resistencias de calentamiento.
- 6.- Termostato, permite el control de la temperatura del agua y tiene un termostato de seguridad por una cierta temperatura máxima alcanzada en el equipo
- 7.- Bomba de circulación, impulsa el agua por el circuito hidráulico.
- 8.- Registrador de temperaturas
- 9.- Registrador de caudal
- 10.- Válvula de equilibrado, sirve para ajustar el caudal circulante
- 11.- Separador de microburbujas, elimina el aire contenido en el circuito hidráulico.
- 12.- Contador de impulsos (caudalímetro)
- 14.- Sonda de temperatura de impulsión, mide la temperatura del agua cuando es impulsada al pozo de estudio.
- 15.- Válvula de corte ida, sirve para cortar el circuito hidráulico en la impulsión
- 16.- Manómetro, muestra la presión del agua en el circuito.
- 17.- Termómetros, muestra las temperaturas de impulsión y retorno.
- 18.- Válvula de seguridad, evacua el agua del circuito hidráulico en caso de exceso de presión.

Para poner en marcha el equipo, se debe llenar completamente el circuito del fluido intercambiador de calor, que en este caso es agua. Para ello se conectan los flexibles al circuito de tuberías enterradas y a través de las válvulas se procederá el llenado. Éste se realiza hasta alcanzar una presión de 2,4, que es la presión recomendada. Esta presión se obtiene de forma directa desde una llave, ya que la presión de agua en la universidad (UCM), durante las horas de la mañana, es lo suficientemente alta, por lo que no es necesario utilizar un artefacto para aumentar la presión. Es conveniente purgar el sistema aflojando ligeramente el tornillo central de la bomba de circulación y volviéndolo a apretar cuando deje de salir aire.

Seguidamente se regula en el termostato la temperatura de trabajo, en este caso 45°C.

Una vez lleno y purgado el circuito, se procede a la conexión eléctrica del módulo por medio del enchufe exterior y se activarán los interruptores ubicados en la parte superior del equipo.

A partir de este momento la instalación funciona de manera continua y al activarse los registradores comenzará el registro de temperaturas y caudales.

Anexo 2: Sensor nivel de agua, presión y temperatura (Level Troll 400)

1.- Unidades de Medida: se eligen las unidades de medidas con las cuales se almacenarán los datos obtenidos. Para este trabajo se eligen las unidades de bar, para la presión; °C para la temperatura; metros para la profundidad.

2.- Método de registro: forma en que los datos se medirán. Para este trabajo, que se monitorea en durante un cierto tiempo, se escoge una forma lineal, que cada cierto intervalo de tiempo almacena un set de datos de presión, temperatura y profundidad.

3.- Intervalo de tiempo para almacenamiento: se programa cada cuanto tiempo se registrará y almacenará cada set de datos. En este trabajo, se escoge tomar un registro cada un minuto.

4.- Tiempo de partida y término de cada medición: se programa la fecha y hora de comienzo de toma de datos y termino de éste. El término de registro también se puede hacer desde el computador, pero en este caso se programa una hora de termino calculando aproximadamente la hora de finalización de la prueba.

5.- Nivel de agua: tiene opciones para agua superficial y subterránea. En este caso, se trabaja con aguas subterráneas y se escoge la opción de que la profundidad que entrega sea la profundidad a la que el instrumento está sumergido considerando el suelo a nivel 0.

6.- Densidad del agua: se puede escoger la densidad del agua con la que se está trabajando. En este caso se escoge la densidad de 999 kg/m³ (agua a 15°C).