



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**MEDICIONES EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE  
APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA DEL EDIFICIO  
BEAUCHEF 851**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CRISTÓBAL ANDRÉS BRAVO ARATA**

**PROFESOR GUÍA:  
MAURICIO TOLEDO VILLEGAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
PAULO HERRERA RICCI**

**SANTIAGO DE CHILE  
MARZO 2014**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL  
POR: CRISTÓBAL BRAVO ARATA  
FECHA: MARZO 2014  
PROF. GUÍA: SR. MAURICIO TOLEDO VILLEGAS

**MEDICIONES EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE  
APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA DEL EDIFICIO  
BEAUCHEF 851**

El presente trabajo de título tiene como objetivo obtener una estrategia de modelación que permita orientar el diseño de sistemas de aprovechamiento geotérmico de baja entalpía integrados constructivamente.

El proyecto se centra en dos de las pilas de entibación y sus respectivos anclajes del edificio Beaufchef 851, estructuras que han sido implementadas con circuitos de tuberías de HDPE de diámetro 32 [mm] en la pila y de 22 [mm] en los anclajes por las que se hace circular agua que moviliza el calor del sub suelo hacia la superficie, o viceversa, pudiendo acondicionar espacios mediante el acople de una bomba de calor, permitiendo de esta forma aprovechar la energía geotérmica. Las pilas de entibación y anclajes presentan condiciones de borde particulares que no se encuentran en la literatura. Las pilas, que son de hormigón armado y tienen 1 [m] de diámetro y 30 [m] de profundidad, no están completamente rodeadas de suelo ya que una parte de ellas está en contacto directo con el muro perimetral que da hacia el patio de luz en su tramo superior (hasta los 14,7 [m] de profundidad) y hacia los subterráneos en su tramo inferior. En cuanto a los anclajes, que son de cables de acero inyectados con lechada y que tienen 12 [cm] de diámetro y un largo de circuito de 41,5 [m], se tiene que están inclinados 20° respecto de la horizontal y se encuentran a distintos niveles de profundidad.

Esta investigación se desarrolla en base a tres grandes ejes de trabajo. El primero de ellos se relaciona con los aspectos prácticos necesarios de llevar a cabo y que permiten recuperar y preservar la implementación. El segundo eje corresponde a modelaciones realizadas con el software computacional EED que incorporen las condiciones de borde de los circuitos mediante procesos de ponderación, superposición y proyección, que a su vez permiten conocer el potencial térmico de la implementación. El tercer eje abarca las mediciones de test de respuesta térmica llevadas a cabo en terreno durante los meses de Agosto y Septiembre de 2013.

Los resultados obtenidos indican que el sistema de entibación implementado tiene el potencial de tomar más del 50% de la demanda energética de calefacción y más del 10% de la de refrigeración en ciclos de carga y descarga del suelo, cantidades que fueron ajustadas y validadas en base a las mediciones realizadas en condiciones de operación, las que muestran que la conductividad térmica efectiva del circuito de la Pila es de 2,19 [W/mK] con una tasa de rechazo de calor de 42,4 [W/m], mientras que para los circuitos de los Anclajes la conductividad térmica efectiva es de 1,92 [W/mK] con una tasa de rechazo de calor de 29,6 [W/m], valores que permiten concluir que la implementación es aprovechable en términos energéticos.

*Para mi familia, mis padres,  
mis hermanas y mis perros.*

## AGRADECIMIENTOS

Es difícil agradecer cuando hay tantas personas a las que hacerlo. En primer lugar a quienes han hecho todo esto posible, mis padres, Jorge Bravo y Ana Arata, los que con su esfuerzo y apoyo incondicional me han demostrado que no hay amor más grande que el de un padre a un hijo. Los ejemplos y valores que me han inculcado son los que han hecho posible que cumpla mis sueños a pesar de las adversidades. Las palabras sobran a la hora de agradecerles todo lo que han hecho por mí y por mis hermanas, sólo espero que estén tan orgullosos de mí como yo lo estoy de tener unos padres como ustedes.

A mis hermanas, Gabriela y Catalina, que son otro motivo más por el cual agradecerle a mis padres. Gracias hermanas por las infinitas risas y llantos juntos, gracias por confiarme sus problemas y por ayudarme a solucionar los míos.

A mi compañera de viaje, Constanza Silva. Gracias por nunca soltar mi mano en estos últimos 5 años y medio y por sacar siempre lo mejor de mí. La Universidad fue una experiencia increíble y todo gracias a ti. Tu confianza me hizo salir siempre adelante y tu compañía me reconfortó en los momentos más difíciles. Gracias por permitirme ser tu compañero de Universidad, gracias por permitirme ser tu compañero de vida.

A mis amigos. Los de la vida: Gonzalo, Nicolás D., Sebastián R., Rafael, Adolfo y Nicolás R., con quienes he pasado 20 años de buenos momentos y en cuyas casas siempre podré entrar como si fueran la mía. Los institutos, con quienes las anécdotas no caen en una sola página y que junto con mi educación son lo que más agradezco de mi querido Instituto Nacional. Los civiles: Carpo, Ariel, Héctor, Sebastián, Ignacio, Carlos, Javier, Jorge y Raúl, junto a los que durante 6 años pasé más tiempo que con mi propia familia y de quienes aprendí tanto como de la Universidad. En especial a Roberto Jorquera, que más que un amigo es un hermano que ha estado conmigo en las buenas y en las malas.

Por último, a toda la gente que fue parte directa de este trabajo de título. A mi profesor guía, don Mauricio Toledo, quien más allá de su apoyo me entregó y enseñó una forma de trabajo que hizo posible que todo esto llegara a buen puerto. A la gente del Laboratorio de Hidráulica y del Mecesup, quienes siempre me brindaron una mano cuando la necesitaba. A la gente de IDIEM, personificados en don Raúl Segovia, quien sin la obligación de hacerlo me apoyó constante y desinteresadamente, ayudándome a superar los desafíos que implica realizar una memoria en una obra en construcción.

## TABLA DE CONTENIDO

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación y descripción del proyecto .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Alcances .....	3
1.4 Puntos de partida y preguntas de investigación.....	4
1.4.1 Investigaciones anteriores .....	4
1.4.2 Modelo de la fuente lineal de calor ( <i>Line Source Model</i> ) .....	5
1.4.3 Base teórica y técnica del software <i>Earth Energy Designer</i> (EED).....	6
1.4.4 Literatura ensayos <i>Thermal Response Test</i> (TRT) y <i>Energy Piles</i> (EP) .....	6
1.4.5 Preguntas de investigación .....	9
1.5 Tareas de investigación .....	9
1.5.1 Aspectos prácticos.....	9
1.5.2 Exploración del potencial de la implementación.....	9
1.5.3 Mediciones en terreno y obtención de rendimientos y parámetros térmicos .....	10
1.5.4 Ajuste y validación.....	11
1.6 Guía de lectura .....	11
2. CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL Y ASPECTOS PRÁCTICOS .....	13
2.1 Introducción al capítulo.....	13
2.2 Descripción experimental.....	13
2.2.1 Pilas .....	14
2.2.2 Anclajes .....	14
2.2.3 Condiciones de la implementación en terreno .....	15
2.2.4 Propiedades y condiciones del suelo .....	16
2.3 Aspectos prácticos.....	18
2.3.1 Reparación y recuperación .....	19
2.3.2 Preservación .....	20
3. CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN .....	21
3.1 Introducción al capítulo.....	21
3.2 Diseño de instalaciones geotérmicas mediante EED .....	21
3.3 Descripción de la modelación .....	22
3.3.1 Datos de entrada de la actual implementación .....	23

3.3.2	Criterio de modelación .....	27
3.3.3	Condiciones de borde .....	28
3.4	Modelos realizados y resultados obtenidos .....	34
3.4.1	Pila patrón .....	34
3.4.2	Pilas distintas configuraciones (criterio de maximización en base a aspectos técnicos).....	35
3.4.3	Anclajes distintos ángulos (criterio de maximización en base a aspectos técnicos) .....	40
3.4.4	Pilas y anclajes con criterio de conservación ambiental .....	41
3.5	Resultados de la modelación considerando condiciones de borde .....	43
3.5.1	Carga total tomada por los circuitos.....	44
3.5.2	Tasa de extracción/rechazo de calor.....	45
3.5.3	Pozos equivalentes .....	47
3.6	Conclusiones del capítulo.....	48
4.	CAPÍTULO IV. MEDICIONES EXPERIMENTALES .....	51
4.1	Introducción al capítulo.....	51
4.2	Equipo TRT.....	51
4.2.1	Descripción y funcionamiento.....	51
4.2.2	Calibración .....	52
4.2.3	Ubicación en terreno .....	52
4.3	Mediciones con suelo no perturbado.....	53
4.3.1	Temperatura ambiente de los subterráneos .....	55
4.4	Mediciones con inyección de calor .....	56
4.5	Conclusiones del capítulo.....	60
5.	CAPÍTULO V. OBTENCIÓN DE RENDIMIENTOS Y PARÁMETROS TÉRMICOS EFECTIVOS.....	63
5.1	Introducción al capítulo.....	63
5.2	Conductividad y resistencia térmica.....	63
5.2.1	Solución analítica ecuación Ingersoll and Plass (1948) .....	63
5.2.2	Conductividad térmica experimental.....	64
5.2.3	Resistencia térmica experimental .....	69
5.3	Rendimiento de la implementación.....	72
5.4	Conclusiones del capítulo.....	73
6.	CAPÍTULO VI. AJUSTE Y VALIDACIÓN.....	75
6.1	Introducción al capítulo.....	75
6.2	Ajuste del potencial de la aplicación.....	75
6.2.1	Ajuste de modelación de la Pila .....	75
6.2.2	Ajuste de la modelación de los Anclajes.....	76

6.3 Validación del potencial de la implementación .....	77
6.4 Conclusiones del capítulo.....	77
7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES FINALES.....	79
7.1 Introducción al capítulo.....	79
7.2 Resultados .....	79
7.3 Discusión.....	81
7.4 Contribución al conocimiento .....	82
7.5 Valor práctico.....	82
7.6 Futuras investigaciones .....	83
7.7 Conclusiones generales .....	84
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
ANEXOS.....	88
ANEXO A: Detalle de los daños en las tuberías.....	88
ANEXO B: Ensayo de esfuerzo a tuberías.....	90
ANEXO C: Reparación de las tuberías .....	91
ANEXO D: Descripción cámara de preservación.....	92
ANEXO E: Detalle de modelos realizados en EED.....	93
ANEXO F: Procedimiento de calibración equipo TRT .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales características de las pilas de entibación implementadas. ....	14
Tabla 2: Principales características de los niveles de anclajes. ....	14
Tabla 3: Características de modelos en EED. ....	21
Tabla 4: Valores de demanda térmica Beauchef 851 (IDIEM, 2013). ....	26
Tabla 5: Resultados obtenidos de las modelaciones de pila patrón. ....	35
Tabla 6: Resultados obtenidos a partir de la modelación A2 Amb. ....	43
Tabla 7: Carga tomada por la pila considerando las condiciones de borde. ....	44
Tabla 8: Cantidad de pilas y anclajes presentes en el proyecto de entibación de Beauchef 851 (Pilotes Terratest S.A., 2009). ....	45
Tabla 9: Aporte térmico total de la implementación. ....	45
Tabla 10: Detalle del modelo realizado y largo equivalente obtenido para la pila. ....	47
Tabla 11: Detalle del modelo realizado y el largo equivalente obtenido para el anclaje. ....	48
Tabla 12: Resultados obtenidos del cálculo del aporte calórico de la bomba hidráulica. ....	52
Tabla 13: Temperatura promedio de los circuitos (19/08/2013). ....	54
Tabla 14: Temperatura promedio de los circuitos (05/09/2013). ....	55
Tabla 15: Obtención conductividad térmica Pila 101 (Vertical Triple U), medición 1. ....	66
Tabla 16: Obtención conductividad térmica Pila 101 (Vertical Triple U), medición 2. ....	66
Tabla 17: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 1. ....	67
Tabla 18: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 2. ....	68
Tabla 19: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 100. ....	68
Tabla 20: Valores referenciales de tasa de extracción en base a la conductividad del suelo (VDI 4640, 2001). ....	72
Tabla 21: Rendimiento en términos de tasa de rechazo de calor para cada circuito. ....	72
Tabla 22: Ajuste de la modelación realizada para la pila mediante la resistencia térmica obtenida por las mediciones. ....	76
Tabla 23: Ajuste de la modelación realizada para los anclajes mediante la resistencia térmica obtenida por las mediciones. ....	76
Tabla 24: Aporte total de la implementación considerando ajustes a partir de mediciones en terreno. ....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Configuración experimental de un TRT (Gehlin, 2002).....	7
Figura 2: Resumen de la investigación ( <i>Cife Horseshoe</i> ). .....	12
Figura 3: Modelo de pila de entibación y sus líneas de anclajes (Pilotes Terratest S.A. 2009). .....	13
Figura 4: Situación general de la implementación (03-04-2013). .....	16
Figura 5: Perfil térmico subsuelo, Septiembre 2013. ....	17
Figura 6: Perfil térmico del subsuelo para distintas épocas del año. ....	18
Figura 7: Situación final implementación. ....	19
Figura 8: Cámara para preservar la implementación instalada en terreno. ....	20
Figura 9: Resumen de parámetros de modelación utilizados. ....	22
Figura 10: Estratigrafía del suelo del proyecto Beauchef 851 (Pilotes Terratest S.A., 2009). .....	23
Figura 11: Distribución anual demanda térmica Beauchef 851 (IDIEM, 2013). ....	27
Figura 12: Diagrama de modelos realizados en EED con separación variable. ....	29
Figura 13: Carga anual tomada por dos pilas en función de la separación entre ellas. ....	29
Figura 14: Dimensión del bulbo de temperatura que se genera en las pilas. ....	30
Figura 15: Condiciones de borde de las pilas de Beauchef 851. ....	31
Figura 16: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 1. ....	31
Figura 17: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 2. ....	32
Figura 18: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 3. ....	33
Figura 19: Proyección vertical del anclaje entrega su profundidad efectiva. ....	33
Figura 20: Consideración realizada para considerar la distinta profundidad de cada anclaje. ....	34
Figura 21: Diagramas de modelos de Pila patrón realizados en EED. ....	34
Figura 22: Diagrama de modelos de pila única realizados en EED. ....	36
Figura 23: Carga anual tomada por una pila única, modelos 1 al 12. ....	36
Figura 24: Diagrama de modelos de línea de 10 pilas separadas a 3 [m] realizados en EED. ....	37
Figura 25: Carga anual tomada por una línea de 10 pilas separadas a 3 [m], modelos 13 al 24. ....	38
Figura 26: Diagrama de modelos de línea de 5 pilas separadas a 6 [m] realizados en EED. ....	39
Figura 27: Carga anual tomada por una línea de 5 pilas separadas a 6 [m], modelos 25 al 36. ....	39
Figura 28: Diagrama de los modelos de anclajes realizados en EED. ....	40
Figura 29: Carga anual tomada por circuitos de anclajes con distintas inclinaciones, modelos A1 al A5. ....	41
Figura 30: Carga anual tomada por una pila única con consideraciones ambientales, modelos 1Amb al 12Amb. ....	42
Figura 31: Tasa de extracción y rechazo en función de la carga anual tomada por la pila. ....	46
Figura 32: Diagrama de los modelos de pozos equivalentes realizados en EED. ....	47
Figura 33: Ubicación del equipo TRT en terreno. ....	53
Figura 34: Variación de la temperatura durante el día en los circuitos (19/08/2013). ....	54
Figura 35: Variación de la temperatura durante el día en los circuitos (05/09/2013). ....	54
Figura 36: Perfil térmico de los subterráneos. ....	56
Figura 37: Medición in situ equipo TRT en Pila 101 entre el 24 y 26 de Agosto. ....	57
Figura 38: Medición in situ equipo TRT en Pila 101 entre el 31 de Agosto y el 02 de Septiembre. ....	57
Figura 39: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 101 entre el 20 y 21 de Agosto. ....	58
Figura 40: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 101 entre el 02 y 04 de Septiembre. ....	58
Figura 41: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 100 entre el 22 y 23 de Agosto. ....	59
Figura 42: Pila 101 (Vertical Triple U), medición 1. ....	65
Figura 43: Pila 101 (Vertical Triple U), medición 2. ....	66
Figura 44: Anclajes pila 101, medición 1. ....	67

Figura 45: Anclajes pila 101, medición 2.....	67
Figura 46: Anclajes pila 100. ....	68
Figura 47: Cálculo de conductividad térmica Pila 101, medición 1.....	69
Figura 48: Cálculo conductividad térmica Pila 101, medición 2. ....	70
Figura 49: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 1.....	70
Figura 50: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 2.....	71
Figura 51: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 100. ....	71

# **1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Motivación y descripción del proyecto**

El cambio climático es uno de los desafíos más grandes a los que el mundo se ha visto enfrentado en los últimos años, y representa un desafío aún mayor para los países en desarrollo como Chile, donde la población es más vulnerable y menos propensa a adaptarse fácilmente, afectando las posibilidades de desarrollo de estos países (Beg et al., 2002). Es fundamental reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de frenar el cambio climático, y una opción para aquello es la utilización de fuentes de energía limpia y renovable, entre las que la geotermia de baja entalpía constituye una alternativa factible para Chile, principalmente debido a su flexibilidad en términos de aplicación (Lund et al., 2011).

La geotermia de baja entalpía representa el uso más popular de la geotermia en el mundo y su funcionamiento se basa en la transferencia de calor desde el sub suelo hacia la superficie (o viceversa) mediante intercambiadores acoplados a bombas de calor. La capacidad térmica mundial instalada para el uso directo de la geotermia es de 48.483 [MWt], con una utilización anual de dicha energía de 117.778 [GWh/año] (Lund et al., 2011). En Chile la geotermia se ha utilizado casi exclusivamente con propósitos recreacionales, principalmente centros termales, sumando una capacidad térmica instalada de 9,11 [MWt] (0,02% de la capacidad térmica mundial instalada) y un uso anual de 36,6 [GWh/año] (0,03% de la energía anual utilizada en el mundo) (Lahsen et al., 2010).

El mayor impacto sobre el incremento en el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía en el mundo lo ha generado la creciente popularidad de las bombas de calor, la que se debe principalmente a la eficiencia y versatilidad de estos sistemas (Rybach and Sanner, 2000), ya que pueden utilizar tanto aguas subterráneas, mediante intercambiadores abiertos, como la temperatura constante del subsuelo bajo cierta profundidad, mediante intercambiadores cerrados, en cualquier parte del mundo. Estudios de Lund et al. (2011) muestran que las bombas de calor aportaron el 47,2% de la energía geotérmica total anual en 2010.

La energía térmica es transportada desde o hacia la bomba geotérmica mediante intercambiadores de calor, que corresponden a estructuras inmersas en el subsuelo. Los pozos intercambiadores de calor (*Borehole Heat Exchangers*, BHE), son preferidos por sobre otros sistemas intercambiadores (de Moel et al., 2010), ya que presentan requerimientos de área y largos de tuberías menores que los intercambiadores horizontales, lo que los hace ideales para proyectos de edificación en altura donde las superficies son reducidas. Además, no tienen las restricciones ni los problemas ambientales que presentan los sistemas abiertos, como la necesidad de acuíferos de cierto tamaño y el riesgo inminente de contaminación debido al intercambio de sus aguas. A lo anterior se suma el hecho de que los BHE's presentan una mayor eficiencia con menor variabilidad que los intercambiadores horizontales, gracias a que la temperatura del suelo

bajo cierta profundidad (entre 15–20 [m]) permanece constante durante todo el año (Sanner, 2001).

Si bien los BHE's presentan condiciones favorables para generar intercambio de calor con el subsuelo, su alto costo inicial representa una barrera considerable para el desarrollo de esta tecnología. Estudios recientes (Luo et al., 2013; Vielma, 2013) muestran que el costo de ejecutar los intercambiadores, considerando las tuberías y el relleno, representa hasta un 90% del costo total del proyecto de calefacción a partir de bomba de calor geotérmica (intercambiadores + bomba de calor + distribución). Es debido a lo anterior que se han desarrollado nuevas tecnologías con el fin de disminuir los costos iniciales de implementar un proyecto con BHE's. Un caso especial de sistemas cerrados verticales son las pilas energéticas (*Energy Piles*, EP) que corresponden a pilas de fundación equipadas con tuberías intercambiadoras de calor. La ventaja de estos sistemas es que se aprovechan con fines energéticos elementos que se tienen que ejecutar por necesidades estructurales, lo que implica una reducción en los costos iniciales. Estas EP's han demostrado su flexibilidad y factibilidad, pudiendo utilizarse todo tipo de pilas y obteniéndose buenos resultados en términos energéticos (de Moel et al., 2010).

El presente trabajo se basa en el estudio de una adaptación de las EP's, que corresponde a la implementación de circuitos de cañerías, mediante integración constructiva (Muñoz, 2011), a pilas de entibación y sus respectivos anclajes, estructuras que tienen condiciones de borde distintas a las encontradas en la literatura. Las pilas de entibación, de 1 [m] de diámetro y 30 [m] de profundidad, no están rodeadas completamente de suelo y presentan una parte de ellas expuesta al muro perimetral que da hacia el patio inglés (condiciones ambientales) y hacia los subterráneos. Los anclajes, de 12 [cm] de diámetro y con un largo de circuito de 41,5 [m], son inclinados y se encuentran a distintos niveles de profundidad.

Habiéndose finalizado las dos etapas previas del presente estudio (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012) se determinan los principales problemas observados, particularmente el hecho de que tras 4 años de realizada la implementación aún no se tiene una noción de su rendimiento efectivo en condiciones de operación, esto debido al avance de la obra. En base a lo anterior, el presente trabajo busca generar una estrategia de modelación que permita orientar el diseño de este tipo de sistemas geotérmicos. Esto se logra a través de la generación de modelos computacionales que exploren el potencial de la implementación considerando sus condiciones de borde. Además, se realizan mediciones en condiciones de operación del sistema, lo que permite conocer su rendimiento experimental, conductividad térmica y resistencia térmica, valores que a su vez son contrastados con los resultados obtenidos de las modelaciones, para así ajustar y validar la estrategia de modelación obtenida.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Obtener una estrategia de modelación que permita orientar el diseño de sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía integrados constructivamente.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Conocer el potencial y el rendimiento térmico del sistema geotérmico implementado en el nuevo edificio de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM). Específicamente:

- Generar variados modelos del sistema implementado a través del software computacional *Earth Energy Designer* (EED).
- Conocer cómo y qué parámetros tienen mayor impacto en el potencial y en el diseño del sistema geotérmico implementado.
- Conocer la tasa de rechazo/extracción de calor, en condiciones de operación y validado a través de mediciones experimentales, de las distintas estructuras equipadas con tuberías intercambiadoras de calor.

## 1.3 Alcances

El presente trabajo se centra en el estudio de dos pilas de entibación, con sus respectivos anclajes, que se implementan con tuberías intercambiadoras de calor con el fin de generar un aprovechamiento geotérmico de baja entalpía (Muñoz, 2011). Dichas pilas y anclajes son parte del sistema de entibación del proyecto Beauchef 851, el cual comprende casi 100 pilas de entibación. Cabe mencionar que de los tres componentes principales de un sistema de calefacción/refrigeración a partir de bomba de calor geotérmica, estas pilas y anclajes implementados cumplen la función de unidad primaria o intercambiador de calor. Los otros dos componentes corresponden a la bomba de calor y al sistema de distribución, los que no se abordan en este trabajo.

El proyecto de memoria se desarrolla en base a tres grandes ejes de trabajo:

- 1) Aspectos prácticos que permitan preservar las instalaciones en terreno.
- 2) Modelaciones con el software EED que incorporen las condiciones de borde especiales del sistema implementado.
- 3) Mediciones, en condiciones de operación del edificio, de test de respuesta térmica en los circuitos implementados en terreno.

Con respecto a las modelaciones, hay que mencionar que la demanda energética considerada por el presente trabajo corresponde a la operación en carga base del edificio, dejando

de lado las posibles cargas peak y la demanda energética por agua caliente domiciliaria. Esto se debe principalmente a que el sistema implementado está pensado para tomar sólo una parte de la demanda energética del edificio.

Debido que parte del presente trabajo se desarrolla en terreno, más específicamente en la obra de construcción del edificio Beauchef 851, las mediciones realizadas en dicho lugar se ven restringidas a los tiempos y condiciones de avance de la obra, lo que genera un impacto tanto en la metodología de trabajo como en los resultados obtenidos.

Finalmente, se debe considerar que más allá de algún resultado en particular, como la tasa de rechazo de calor o la conductividad térmica, este trabajo de título busca generar una estrategia de modelación que permita diseñar instalaciones geotérmicas integradas constructivamente y que presenten condiciones de borde como las observadas en este proyecto, que corresponde a la exposición parcial de las pilas y a la inclinación de los anclajes.

#### **1.4 Puntos de partida y preguntas de investigación**

Desarrollar un trabajo de investigación requiere de una sólida base teórica que lo fundamente, motivo por el cual la revisión bibliográfica representa los puntos de partida para llevarlo a cabo. Además, se pueden conocer las limitaciones teóricas que presenta el tema abordado, lo que permite comprender la posible contribución al conocimiento del presente trabajo.

##### 1.4.1 Investigaciones anteriores

El presente estudio es continuación y consecuencia de trabajos desarrollados anteriormente en el proyecto Beauchef 851. El primero de ellos, llevado a cabo por Muñoz (2011) tiene como objetivo principal generar un aprovechamiento geotérmico a través de la implementación de circuitos de cañerías flexibles adosadas a la armadura de las pilas y anclajes del sistema de entibación del edificio. En primer lugar, se genera una metodología constructiva que logra complementar la implementación de las pilas de entibación y sus respectivos anclajes con la construcción propia de estas. Además, se confecciona un equipo con el que se realizan las primeras mediciones en terreno a partir de las cuales se obtienen algunas propiedades térmicas del suelo, como conductividad y resistencia térmica. Por último, se realiza un análisis de costos que posibilita conocer la diferencia, en términos monetarios, de una pila sin implementar y una pila implementada. Los resultados de este trabajo muestran que la implementación de las pilas y anclajes es factible bajo la metodología propuesta, ocasionando un aumento en los costos de construcción de un 17%. Se concluye además que las condiciones y propiedades del suelo son favorables para la implementación de sistemas geotérmicos, obteniéndose una temperatura promedio del sub suelo a baja profundidad de 15,3 [°C], una conductividad térmica efectiva de los anclajes de 2,536 [W/mK] y una resistencia térmica efectiva de 0,293 [mK/W].

Posteriormente se lleva a cabo el trabajo de Guggisberg (2012), el cual tiene como objetivo continuar y mejorar el entendimiento del potencial aprovechamiento geotérmico

implementado. Para ello se realiza un estudio y re diseño del equipo de medición test de respuesta térmica, lo cual implica contar con un equipo mejorado que permite llevar a cabo una serie de mediciones para la obtención de parámetros de diseño de la instalación, como la conductividad térmica y el rendimiento energético. Dichas mediciones fueron realizadas en base a distintas metodologías, dependiendo del parámetro que se quiera obtener. Los resultados de este trabajo muestran que el hecho de contar con un equipo de medición mejorado permite obtener valores más cercanos a la realidad. Para el caso de la pila, se obtiene un valor de 1,6 [w/mK] para la conductividad térmica, mientras que los anclajes alcanzan un valor de 1,7 [W/mK]. Lo anterior permite obtener finalmente el rendimiento del sistema geotérmico implementado, que para el caso de las pilas fue de 150 [W/m] y para los anclajes de 100 [W/m].

En cuanto a las limitaciones teóricas observadas a partir de los trabajos anteriores, hay que destacar el hecho de que pasados 4 años desde la implementación del sistema geotérmico aún no se tiene una noción real del rendimiento del sistema, debido a que las mediciones realizadas hasta el momento no representan condiciones de operación ya que el estado de avance de la obra no lo permitía, además del hecho de que la cantidad de calor, en [W], entregada al sistema durante las mediciones está por sobre lo esperado en función de las propiedades del suelo (VDI 4640, 2001). Lo anterior generaría que el aprovechamiento fuera insostenible a lo largo del tiempo debido a que el suelo se saturaría en el corto plazo. No menos importante es el hecho de que el tiempo de duración de las mediciones no es el adecuado, según la literatura, para una correcta aplicación de las ecuaciones que permiten la obtención de los parámetros (Ingersoll and Plass, 1948).

#### 1.4.2 Modelo de la fuente lineal de calor (*Line Source Model*)

A lo largo de los años, varios modelos analíticos y numéricos han sido desarrollados y usados como una herramienta de diseño para predecir, entre otras cosas, el mecanismo de transferencia de calor dentro de un pozo, la conductividad térmica y las interferencias térmicas entre pozos (Javed et al., 2009).

La primera gran contribución a la modelación de BHE's vino de Ingersoll and Plass (1948) y corresponde a la solución analítica más utilizada a la hora de interpretar datos para predecir el mecanismo de transferencia de calor al interior de un pozo intercambiador en estado estacionario (Signorelli et al., 2007). Este modelo fue desarrollado a partir de la teoría de fuente lineal de Kelvin (1882) y es implementado para modelar la transferencia radial de calor mediante una solución analítica. Se asume que el pozo intercambiador de calor (BHE) es una fuente lineal de calor infinitamente larga inmersa en un medio homogéneo, isotrópico e infinito. Además, el modelo asume que no hay flujo de calor vertical a lo largo del BHE y que el flujo de calor radial es constante, lo que genera que la temperatura en la pared del pozo sólo dependa del tiempo y de la distancia radial desde el eje del pozo.

En términos prácticos, este modelo permite obtener la conductividad y resistencia térmica del BHE mediante datos obtenidos a partir de un test de respuesta térmica. Las ecuaciones son expuestas en el Capítulo V del presente trabajo.

Con respecto a las limitaciones teóricas, se tiene que a este modelo hay que aplicarle una serie de simplificaciones y supuestos para ser adaptado al presente trabajo, siendo el principal de ellos el hecho de que las pilas de entibación no se encuentran rodeadas de un medio infinito y homogéneo, ya que una parte de ellas está expuesta al patio de luz del edificio y al muro perimetral de los estacionamientos. Para el caso de los anclajes, estos se encuentran inclinados, lo que afecta a la relación entre flujo vertical y radial de calor. Además, las pilas y anclajes no son infinitamente largas con respecto a sus diámetros, sobre todo en el caso de la pila, la que debido a su diámetro de 1 [m] posee un gran volumen. Se tiene incerteza entonces sobre la aplicabilidad de este modelo al tipo de instalaciones estudiadas en este trabajo.

#### 1.4.3 Base teórica y técnica del software *Earth Energy Designer* (EED)

El software *Earth Energy Designer* (EED) es un programa computacional para el diseño de BHE desarrollado por la empresa BLOCON ([www.buildingphysics.com](http://www.buildingphysics.com)). Su fácil uso, corta curva de aprendizaje y rápidos tiempos de cálculo, gracias a su base de datos inherente, hacen de este programa una herramienta útil para el diseño ingenieril de sistemas de bombas de calor geotérmicas (*Ground Source Heat Pump*, GSHP).

Su funcionamiento se basa en el trabajo presentado por Eskilson (1987), quien modeló numéricamente la respuesta térmica de un BHE usando funciones especiales (adimensionales) de respuesta de temperatura. Estas funciones de respuesta, llamadas *g-functions*, dependen del espaciamiento entre pozos y de la profundidad de estos, y pueden ser incorporadas al software de modelación como base de datos pudiendo ser utilizadas sin las desventajas inherentes de los modelos numéricos (limitada flexibilidad y tiempos de modelación computacional extendidos).

Validaciones hechas sobre datos medidos de instalaciones existentes, así como sobre simulaciones numéricas efectuadas con otros programas (TRADIKON-3D) muestran que EED entrega una muy buena predicción de la temperatura de respuesta (Hellström et al., 1997).

La base de datos del programa entrega parámetros clave del suelo (conductividad térmica y calor específico) así como propiedades del material de las tuberías y del fluido transportador de calor. Los promedios mensuales de las cargas de calefacción y refrigeración son el valor de entrada. El programa entrega un reporte de salida y gráficos con la temperatura de respuesta del fluido circulante. El detalle de los datos de entrada es presentado en el Capítulo III del presente trabajo.

Entre las limitaciones de la aplicabilidad de este software al presente trabajo se tiene que EED está pensado para modelar pozos verticales rodeados de suelo, por lo que hay que realizar ciertas consideraciones para tomar en cuenta las condiciones de borde de este trabajo.

#### 1.4.4 Literatura ensayos *Thermal Response Test* (TRT) y *Energy Piles* (EP)

Para dimensionar o simular el desempeño de un BHE, el conocimiento de las propiedades térmicas del suelo en las cercanías del pozo es fundamental (Sanner et al., 2005). El test de

respuesta térmica (*Thermal Response Test*, TRT) es un método efectivo para determinar dichas propiedades, las que tienen un efecto importante en el número de pozos requerido para un sistema de calefacción geotérmico (Sharqawy et al., 2009). En este test, una carga térmica conocida es aplicada al BHE y mediciones de la temperatura de entrada y salida del fluido circulante son tomadas. La Figura 1 muestra la configuración experimental de la aplicación de un TRT, donde se puede observar el calefactor que permite entregarle una cantidad de calor conocida al fluido circulante así como los elementos necesarios para la obtención de datos.

El TRT fue presentado por primera vez por Mogensen (1983) como un método para determinar valores in situ de la conductividad térmica del suelo y la resistencia térmica en sistemas de BHE's.

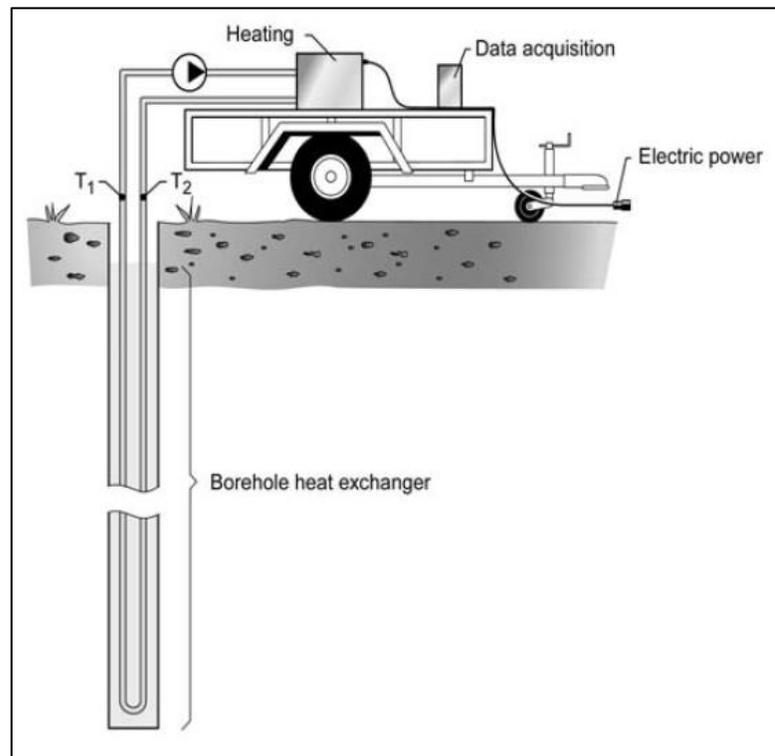


Figura 1: Configuración experimental de un TRT (Gehlin, 2002).

El TRT permite obtener experimentalmente la conductividad y resistencia térmica efectiva del pozo, mediante la aplicación directa de la ecuación de Ingersoll and Plass (1948). Estos parámetros de conductividad y resistencia se denominan efectivos ya que incorporan la influencia de posibles flujos subterráneos de agua, así como la influencia del relleno del pozo, el material de las tuberías y la diferente composición del suelo a lo largo del pozo.

El TRT ha sido llevado a cabo con éxito en distintas partes del mundo, con distintas condiciones ambientales y distintos tipos de suelo (Yavuzturk, 1999; Gehlin, 2002; Florides and Kalogirou, 2008; Sharqawy et al., 2009; Esen and Inalli, 2009; Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012), demostrando su amplia aplicabilidad a la hora de obtener parámetros como conductividad y resistencia térmica de un pozo.

Entre las limitaciones de los TRT se tienen los efectos transientes que generan severas fluctuaciones de la temperatura en las primeras horas de ensayo, por lo que dichos valores tienen que ser excluidos (Sharqawy et al., 2009), lo que genera que la duración de estos ensayos tenga que ser prolongada para así alcanzar el estado estacionario de transferencia de calor y obtener resultados más exactos. Hay estudios donde incluso se han tenido que descartar las primeras 25 [hrs] de medición para cumplir con el tiempo mínimo requerido por el modelo de fuente lineal (Florides and Kalogirou, 2008). Otra de las limitaciones para obtener buenos resultados a partir de un TRT es instalar el sistema correctamente y minimizar las influencias externas, como la influencia ambiental, requiriendo que el equipo esté fuertemente aislado (Esen and Inalli, 2009).

Las Pilas Energéticas (*Energy Piles*, EP) corresponden a una tecnología innovadora que busca integrarse constructivamente a la ejecución de pilas de fundación, para así disminuir los altos costos iniciales asociados a la ejecución de pozos intercambiadores (Luo et al., 2013). Las EP cumplen dos propósitos ya que son diseñadas como fundaciones estructurales y como intercambiadores de calor, gracias a la incorporación de circuitos de tuberías al interior de las pilas. El hecho de que una operación de perforación sea requerida para lograr dos objetivos sugiere un ahorro significativo en los costos de instalación (Boennec, 2008).

En cuanto a los materiales, se ha encontrado que las pilas de hormigón armado son ventajosas debido a la alta capacidad de almacenamiento termal y a la mejorada capacidad de transferencia de calor de dicho material (Gao, 2008). Estudios de Brandl (2006) muestran que las EP's de hormigón armado son las más comunes alrededor del mundo.

Con respecto a la disposición del circuito de tuberías, Gao et al. (2008) muestra que los circuitos con forma de W son más efectivos que los circuitos en U, pero esta efectividad se ve contrarrestada por un mayor costo.

Estudios demuestran la factibilidad de aplicación de esta tecnología, logrando buenos rendimientos en términos energéticos (de Moel et al., 2010). Además, esta tecnología presenta una gran flexibilidad, pudiendo implementar y aprovechar energéticamente varios tipos de estructuras, como losas de fundación, muros diafragma e incluso paredes de túneles (Brandl, 2006). A modo de ejemplo, se tiene que en el aeropuerto de Zurich, el terminal Dock Midfield fue construido sobre 440 pilas de fundación, de las cuales 300 fueron convertidas en EP's (Pahud and Hubbuch, 2007). Estudios de desempeño concluyen que el 85% de la demanda anual de calefacción es tomada por las pilas implementadas, mientras que una combinación entre las EP's y un sistema convencional de refrigeración es capaz de tomar toda la demanda anual de refrigeración (Pahud and Hubbuch, 2007).

Las limitaciones teóricas encontradas con respecto a las EP's muestran que no hay mayor información sobre pilas de entibación, con condiciones de exposición parcial al medio ambiente, implementadas con sistemas de aprovechamiento geotérmico, ni menos aún de sus anclajes postensados.

### 1.4.5 Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación se determinan a partir de las limitaciones teóricas que expone la revisión bibliográfica realizada.

- ¿Qué estrategia de modelación representa de mejor manera las condiciones y características del sistema implementado?
- ¿Cuál es el rendimiento que posee el sistema de pilas y anclajes energéticos implementado mediante integración constructiva?

## **1.5 Tareas de investigación**

El presente trabajo se basa en tres ejes principales de trabajo (Aspectos prácticos, Modelaciones y Mediciones en terreno), los que derivan en tareas de investigación específicas.

### 1.5.1 Aspectos prácticos

El método de trabajo del presente eje comienza por el completo análisis de las condiciones experimentales que se evidencian en terreno, se observa la necesidad de reparar la instalación para así llevar a cabo las mediciones que forman parte del presente trabajo.

Tras lo evidenciado en terreno se llega a la conclusión de que es necesario reemplazar con tuberías nuevas la parte del circuito que ha estado expuesta durante 4 años a las adversas condiciones que implica una obra de construcción. Se realizan ensayos en laboratorio que permiten conocer la condición mecánica que tienen las tuberías de los circuitos antes de realizar la reparación en terreno.

Se decide realizar la conexión entre tuberías mediante la unión con *fittings*, previa aplicación de calor a las tuberías para que estas recuperen sus propiedades elásticas y pueden ser expandidas.

Una vez realizada la reparación, es imperativo generar una forma de preservación de la implementación, lo que se lleva a cabo mediante la instalación de una cámara de hormigón pre fabricado que impide que las tuberías vuelvan a ser dañadas.

### 1.5.2 Exploración del potencial de la implementación

Mediante la utilización del software computacional *Earth Energy Designer* (EED), se realiza un total de 66 modelos que permiten conocer el potencial de la implementación mediante la variación de distintos parámetros.

Se realizan 3 modelos denominados de Pila Patrón, que implican variar el tipo de carga tomada por el pozo intercambiador (Sólo calefacción, Sólo refrigeración, Ciclo calefacción/refrigeración).

Debido a la necesidad de conocer la influencia de la interacción entre pozos, se realizan 7 modelos en los que se varía la separación entre dos pilas dejando constante los otros parámetros y considerando siempre ciclos de calefacción/refrigeración.

Posteriormente, se realizan 36 modelos para el caso de las pilas, donde se varía la configuración de estas, la conductividad térmica del suelo, el tipo de fluido circulante y el caudal de dicho fluido, considerando en cada caso ciclos de calefacción/refrigeración. Cabe destacar que estas modelaciones son realizadas en base a aspectos técnicos, los que consideran maximización con respecto a la capacidad de la bomba de calor.

Para el caso de los anclajes, se realizan 5 modelos en los que se varía el ángulo de inclinación de los anclajes, manteniendo constante y en valores recomendados los otros parámetros. Estos modelos también son llevados a cabo tomando en cuenta maximización

Se realizan otros 13 modelos, 12 para pilas y 1 para anclajes, que se realizan en base a consideraciones ambientales, siguiendo una metodología similar a la aplicada en los modelos anteriores realizados para pilas y anclajes.

Finalmente se realizan 2 modelaciones denominadas Pozo Equivalente, que tienen como objetivo ver la equivalencia, en función de la carga tomada, entre las pilas y anclajes efectivos implementados en terreno en comparación con pozos geotérmicos de dimensiones estándar.

### 1.5.3 Mediciones en terreno y obtención de rendimientos y parámetros térmicos

El método de trabajo en este eje se inicia con la aplicación de un test de respuesta térmica en terreno, el que en conjunto con la ecuación de Ingersoll and Plass (1948) permite la obtención de parámetros térmicos como el rendimiento, la conductividad térmica y la resistencia térmica.

En primer lugar se llevan a cabo mediciones en terreno con el equipo TRT, las que se efectúan entre el 20 de Agosto y el 4 de Septiembre, en dos series. Se realizan dos mediciones en el caso del circuito de la pila 101 y dos mediciones en el circuito de los anclajes de dicha pila. Para el caso del circuito de anclajes de la pila 100 se realiza sólo una medición ya que la segunda fue interrumpida por la instalación de la cámara encargada de preservar la instalación. Con respecto al circuito de la pila 100, este no pudo ser recuperado, por lo que no se realizan mediciones en él. Las mediciones realizadas tienen una duración aproximada de 40 horas cada una, llevándose a cabo durante dos días y una noche para el caso de la primera serie de mediciones, y durante dos noches y un día para la segunda serie de mediciones.

Una vez realizadas las mediciones, y con los datos obtenidos a partir de estas, se procede a calcular el rendimiento del sistema, así como su conductividad y resistencia térmica, a través de la aplicación del modelo de la fuente lineal de calor (Ingersoll and Plass, 1948).

#### 1.5.4 Ajuste y validación

El proceso de ajuste y validación se lleva a cabo uniendo la modelación realizada del sistema con las mediciones efectuadas en este, pudiendo así cerrar el círculo y ver cuán válidos son los resultados obtenidos en cada caso.

Se realizan 2 modelos en el software EED que tienen como parámetro de entrada la resistencia térmica experimental obtenida a partir de las mediciones realizadas en terreno, tanto para el circuito de la pila como para los circuitos de los anclajes. En base a los resultados obtenidos a partir de estos modelos se realiza un ajuste de los valores obtenidos anteriormente, pudiéndose así validar la estrategia propuesta y orientar de mejor forma el diseño de este tipo de implementaciones.

#### **1.6 Guía de lectura**

El capítulo I entrega una descripción general del proyecto a desarrollar en el presente trabajo, dando a conocer los objetivos y los procedimientos para alcanzarlos. El capítulo II muestra los aspectos prácticos necesarios de llevar a cabo para realizar las mediciones en terreno. En el capítulo III se presentan las modelaciones realizadas para explorar el potencial de la implementación. El capítulo IV muestra las mediciones experimentales realizadas con el equipo TRT, mientras que el capítulo V presenta los parámetros obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación de Ingersoll and Plass (1948) a los datos recogidos en terreno. El capítulo VI desarrolla el ajuste y validación realizado mediante modelaciones que utilizan como parámetros de entrada los valores obtenidos a través de las mediciones experimentales. En el capítulo VII se muestran las conclusiones y comentarios finales, para dar paso a la bibliografía y posteriores anexos del presente trabajo.

La Figura 2 resume el presente trabajo mediante la aplicación del método “horseshoe”, el cual fue desarrollado por el *Center of Integrated Facility Engineering* (CIFE) de la Universidad de Stanford (Fischer, 2006). Este modelo formaliza el conocimiento experimental en base a un proceso iterativo en donde la revisión constante del trabajo realizado permite que no se pierdan los objetivos iniciales planteados y así mantener una concordancia y coherencia a lo largo de toda la investigación.

**"MEDICIONES EN CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA DEL EDIFICIO BEAUCHEF 851"**

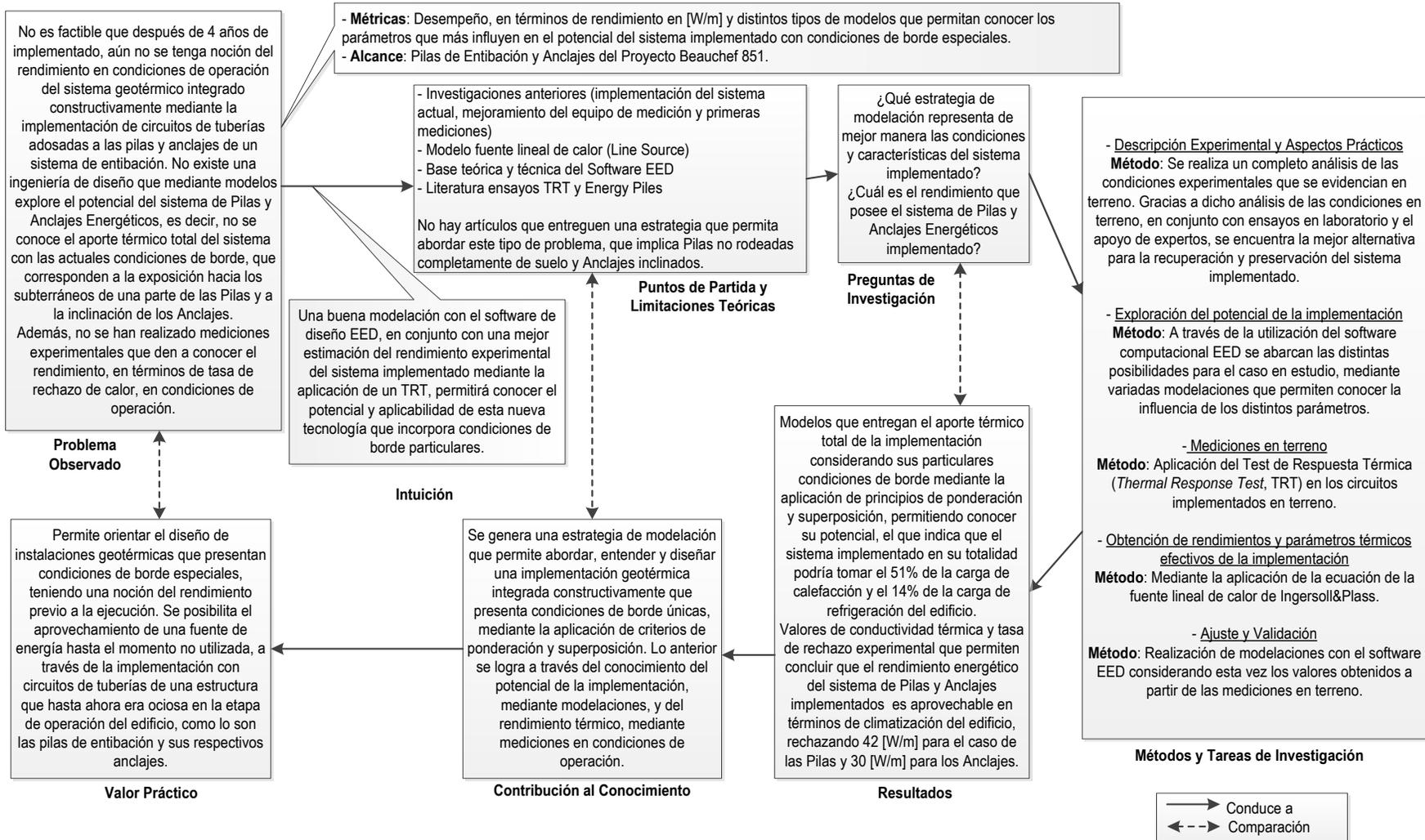


Figura 2: Resumen de la investigación (*Cife Horseshoe*).

## 2. CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL Y ASPECTOS PRÁCTICOS

### 2.1 Introducción al capítulo

En el presente capítulo se hace una breve descripción experimental de la implementación en terreno, así como de algunas características importantes de destacar. Además, se muestran los aspectos prácticos realizados con el objetivo de recuperar y preservar la implementación geotérmica y así poder realizar las mediciones necesarias.

### 2.2 Descripción experimental

El presente trabajo se basa en el estudio de una implementación geotérmica que se integra constructivamente a la ejecución de pilas y anclajes del sistema de entibación del edificio Beauchef 851 (Muñoz, 2011). Las pilas implementadas corresponden a la número 100 y 101, las que se encuentran separadas a 3 [m] entre sí. Fueron también implementadas las tres líneas de anclajes de cada una de estas pilas. La Figura 3 muestra un modelo de la pila y sus anclajes.

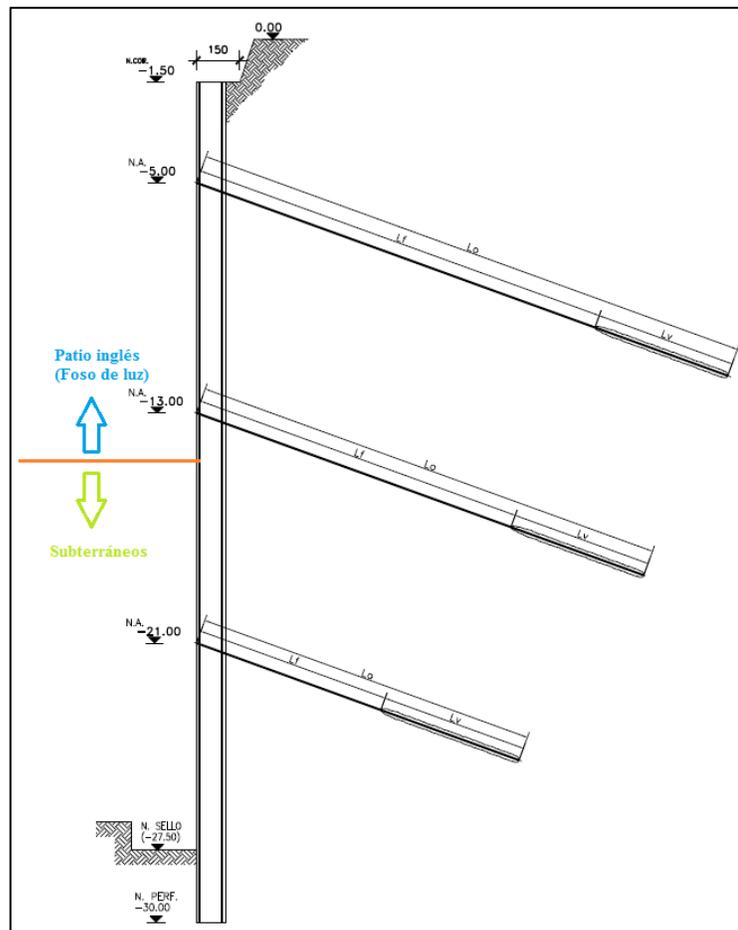


Figura 3: Modelo de pila de entibación y sus líneas de anclajes (Pilotes Terratest S.A. 2009).

### 2.2.1 Pilas

La implementación se realizó en las pilas 100 y 101 del sistema de entibación, siendo la diferencia entre ellas la distribución del circuito de cañerías en su interior. La Pila 100 se implementó con un circuito helicoidal, mientras que la Pila 101 se implementó con un circuito vertical de triple U (tres bajadas y tres subidas). La Tabla 1 muestra un resumen de las características más relevantes de las pilas de entibación implementadas. Más detalles al respecto se pueden encontrar en el trabajo de Muñoz (2011).

Tabla 1: Principales características de las pilas de entibación implementadas.

Característica	Pila 100	Pila 101
Material Pila	Hormigón Armado	
Profundidad Pila	30 [m]	
Diámetro Pila	1 [m]	
Diámetro Aro de Rigidez (Zuncho de Acero)	850 [mm]	
Separación entre Pilas	3 [m]	
Material Tuberías	HDPE (PEX)	
Diámetro Tuberías	32 [mm]	
Configuración Circuito	Helicoidal	Vertical Triple U
Largo Circuito Tuberías	170 [m]	
Separación entre tuberías (S)	30 [cm]	Variable

Con respecto al funcionamiento de los circuitos dentro de las pilas, cabe mencionar que hasta la investigación anterior (Guggisberg, 2012) se encontraba operativo sólo el circuito vertical de la Pila 101, ya que por el circuito helicoidal de la Pila 100 no se ha podido hacer circular agua con suficiente caudal.

### 2.2.2 Anclajes

Se implementaron los tres niveles de anclajes (inclinados) de las pilas 100 y 101 los que se conectan en serie mediante tuberías en forma de U que salen y entran en cada uno de los niveles, generando un gran circuito independiente al de las pilas y de largo total efectivo de 41,5 [m]. La Tabla 2 muestra un resumen de las principales características de los 3 niveles de anclajes de cada pila.

Tabla 2: Principales características de los niveles de anclajes.

Anclaje	Profundidad	Largo Total	Largo Implementado	Inclinación respecto a la horizontal
Nivel 1	5 [m]	19,6 [m]	17,5 [m]	20°
Nivel 2	13 [m]	17,2 [m]	14,5 [m]	20°
Nivel 3	21 [m]	12,5 [m]	9,5 [m]	20°

En cuanto a la implementación en sí, esta presenta las siguientes características:

- Diámetro perforación anclaje: 12 [cm].
- Material anclaje: 9 cables de acero de diámetro 0,6'' c/u más lechada de hormigón.
- Material tuberías: HDPE (PEX).
- Diámetro tuberías: 22 [mm].
- Largo del circuito: 41,5 [m].

Cabe mencionar que hasta la investigación anterior (Guggisberg, 2012) se encontraban operativos los dos circuitos correspondientes a los anclajes.

### 2.2.3 Condiciones de la implementación en terreno

Durante las mediciones realizadas como parte del presente trabajo, entre Agosto y Septiembre de 2013, el proyecto Beauchef 851 se encuentra en etapa de terminaciones, habiendo finalizado los trabajos de obra gruesa, por lo que las pilas de entibación no se encuentran expuestas directamente a las condiciones ambientales ya que el muro perimetral alcanzó su cota 0,0. En cuanto a los anclajes, estos se encuentran embebidos completamente en su longitud bajo suelo durante las mediciones.

Cabe destacar el contacto que existe entre una cara de las pilas y el muro perimetral, el cual es de hormigón armado y de un espesor de 30 [cm], el que a su vez da en su mitad superior al patio de luz del edificio (el que presenta condiciones ambientales) y hacia los subterráneos en su mitad inferior. Esto representa la principal condición de borde que hace que esta implementación sea distinta a lo observado en la literatura (de Moel et al., 2010) al no encontrarse completamente rodeada de suelo. Es importante entonces conocer la condición térmica tanto del patio de luz como de los subterráneos, ya que esto permite entender los resultados obtenidos.

En cuanto a lo que sucede en la superficie se tiene que desde la cabeza de las pilas las tuberías de todos los circuitos (pilas y anclajes) se encuentran expuestas a condiciones ambientales hasta el punto de conexión con el TRT, el cual se encuentra a una distancia aproximada de 5 [m] debido a restricciones inherentes de la obra en construcción.

Ahora bien, entre la investigación anterior (Guggisberg, 2012) y la actual, la parte de las tuberías que se encuentran sobre la superficie se vieron expuestas a las condiciones de trabajo que se realizaron en la obra durante ese tiempo, lo que implica que sufrieran severos daños que no permiten realizar las mediciones necesarias. Además, la exposición constante a la radiación solar generó que las tuberías perdieran sus propiedades de flexibilidad.

La Figura 4 muestra la situación general de la implementación. Se puede ver que varias de las tuberías se encuentran cortadas. Se decide entonces excavar hasta llegar a las cabezas de las pilas, para así tener un mejor entendimiento de las condiciones reales del sistema. La excavación permite ver que hay más daño en las cercanías de las cabezas de las pilas.



Figura 4: Situación general de la implementación (03-04-2013).

El estado de la instalación hace necesaria una reparación de la misma para poder llevar a cabo las mediciones que forman parte del presente trabajo.

#### 2.2.4 Propiedades y condiciones del suelo

Como se mencionó anteriormente, conocer las propiedades del suelo en el que se instala un BHE es fundamental, ya que tienen gran influencia en el futuro desempeño de dicho sistema (Sanner et al., 2005). Por otro lado, permiten tener una idea del rango de valores posibles a obtener en cuanto a conductividad térmica. Además, es fundamental conocer la estratigrafía y temperatura del sub suelo, ya que estos son parámetros necesarios tanto para realizar las modelaciones con el programa computacional EED, como para la obtención de la conductividad y resistencia térmica a través de las mediciones.

##### a) Estratigrafía

La estratigrafía del lugar se obtiene a partir del estudio geotécnico realizado por la empresa Pilotes Terratest S.A. (2009). Dicha estratigrafía muestra que el suelo en el cual se encuentra la implementación corresponde principalmente a estratos constituidos por grava, suelo que posee una mala conductividad térmica según normas internacionales (VDI 4640, 2001). Además, el estudio geotécnico permite ver que el suelo no cuenta con napas de agua subterránea, lo que descarta la inclusión de posibles efectos de convección en la transferencia de calor, lo que a su vez hace más aplicable la ecuación de la fuente lineal de calor de Ingersoll and Plass (1948) para la obtención de los parámetros térmicos (Signorelli et al., 2007).

## b) Perfil de temperatura del suelo

El perfil térmico vertical del suelo es obtenido a partir de dos líneas de sensores LM35DZ ubicados en una calicata en las cercanías de la implementación (Muñoz, 2011). Estos sensores permiten obtener la temperatura del suelo hasta una profundidad de 6 [m]. Cabe destacar que en el sector donde se emplazan los sensores recientemente se realizaron trabajos de movimiento de tierra y colocación de un dren que sirve para evacuar aguas lluvias, por lo que los valores obtenidos pueden verse afectados por este hecho, sobre todo por la sensibilidad que presentan los sensores a los impactos. La Figura 5 grafica los resultados obtenidos en el presente trabajo para el perfil térmico del sub suelo. Se puede ver en primer lugar las anomalías que presentan los sensores a la profundidad de 1,5 [m]. Además, cabe mencionar que los valores correspondientes a la profundidad de 0 [m] representan la temperatura ambiente del lugar al día y hora correspondientes (DGF, 2013). Se puede ver también que el sensor ubicado a los 2 [m] de profundidad del cable sur no entregó resultados.

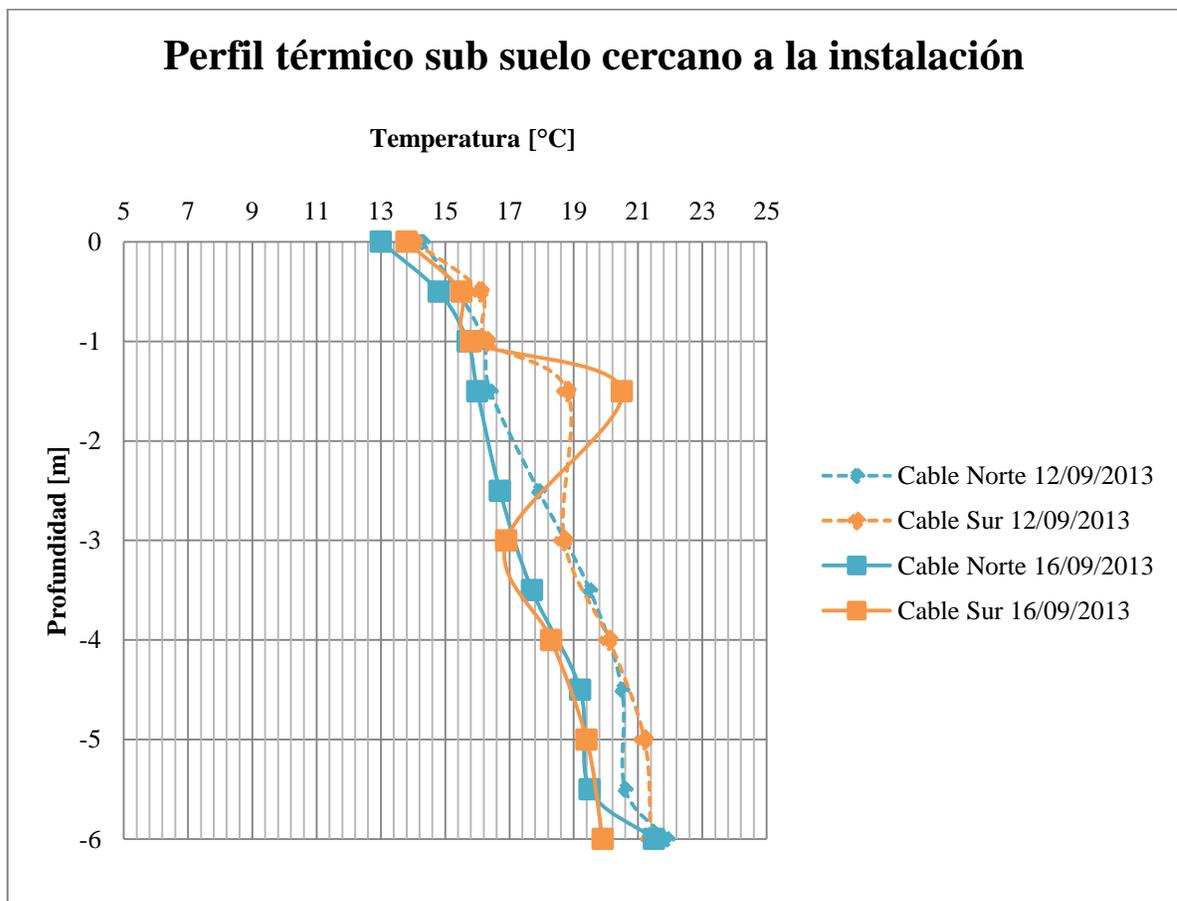


Figura 5: Perfil térmico subsuelo, Septiembre 2013.

Los datos obtenidos por el presente trabajo, en conjunto con los obtenidos en trabajos anteriores (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012), permiten obtener un perfil térmico del sub suelo para distintos meses del año. La Figura 6 muestra el perfil térmico del sub suelo para distintos meses de distintos años.

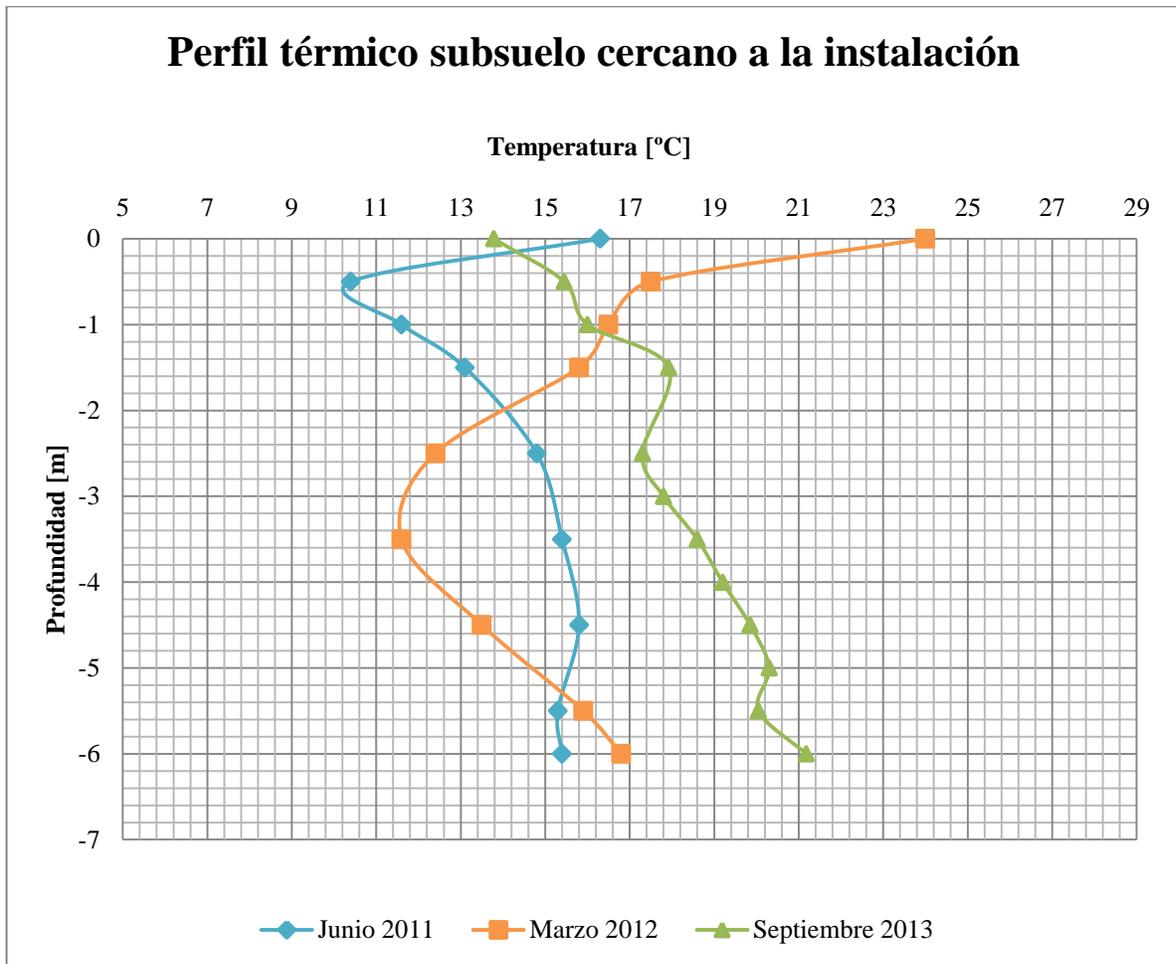


Figura 6: Perfil térmico del subsuelo para distintas épocas del año.

Se puede ver que las mediciones realizadas en Septiembre de 2013 se alejan de lo obtenido con anterioridad, lo que se puede deber a los trabajos realizados en el sector donde se encuentran los sensores de temperatura. Se decide entonces no tomar en cuenta los datos correspondientes a dicho mes y se utiliza el valor de 16°C para la temperatura del suelo (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012) tanto en las modelaciones como en las mediciones.

### 2.3 Aspectos prácticos

Una parte importante del presente trabajo corresponde a los distintos aspectos prácticos necesarios de realizar para poder llevar a cabo las mediciones que permiten obtener los parámetros térmicos buscados.

Como se mencionó anteriormente, las actuales condiciones de la implementación hacen inviable la aplicación de un TRT, por lo que uno de los puntos de partida corresponde a la reparación de la implementación y la posterior preservación de esta con el objetivo de seguir realizando mediciones a lo largo del tiempo, las que a su vez permiten conocer el impacto de esta implementación en las propiedades térmicas de suelo en el mediano y largo plazo.

### 2.3.1 Reparación y recuperación

La Figura 4 muestra el estado en el cual se encuentran las tuberías sobre la superficie tras haber estado expuestas a las condiciones de trabajo en terreno y ambientales. Se decide entonces reemplazar estos últimos 5 [m] de tuberías con unas nuevas, para así asegurar una buena circulación del fluido durante las mediciones con el TRT.

La alternativa más directa para el reemplazo de las tuberías corresponde a la expansión de estas y a la posterior conexión de nuevas tuberías mediante *fittings* a presión. Tras ensayos de esfuerzo realizados a las tuberías se llega a la conclusión de que no es factible hacer esto ya que la radiación solar ha generado que estas pierdan sus propiedades de flexibilidad, quebrándose a la hora de expandirlas. Otra alternativa explorada corresponde a la termofusión, en donde no es necesario realizar expansión de las tuberías para poder unir las entre sí.

Finalmente se decide tomar una alternativa que combina las dos expuestas anteriormente. En primer lugar, antes de expandir las tuberías, se les aplica calor (mediante una pistola de aire caliente), lo que permite que estas recuperen sus propiedades de flexibilidad, expandiéndose sin quebrarse. Este método fue ensayado en laboratorio antes de aplicarlo en terreno, mostrando buenos resultados.

La Figura 7 muestra el estado final de la implementación tras haberla reparado. Cabe mencionar que siguiendo recomendaciones de diseño de normas internacionales (IGSHPA, 2011), la parte de las tuberías que están expuestas al medio ambiente son fuertemente aisladas, sobre todo en el sector de las conexiones de bronce (*fittings*). Además, se utilizó un pegamento epóxico para sellar pequeñas grietas de partes de tuberías que no se pudieron reemplazar.



Figura 7: Situación final implementación.

Ensayos de prueba con el TRT muestran que la nueva implementación funciona según lo esperado, circulando el agua sin presentar mayores problemas, como podrían haber sido filtraciones en las conexiones nuevas.

### 2.3.2 Preservación

La preservación de la implementación geotérmica es fundamental ya que el impacto en el mediano y largo plazo que pueda generar dicha implementación en las propiedades térmicas del suelo es uno de los aspectos relevantes de conocer. Es necesario entonces llevar a cabo alguna medida que tenga como objetivo mantener la implementación en buenas condiciones para así seguir realizando mediciones a lo largo del tiempo.

Con el fin de proteger las tuberías se realiza la instalación de una estructura pre fabricada de hormigón, lo que las aísla completamente de las condiciones externas. Dicha estructura, denominada cámara pública para colector, tiene las dimensiones necesarias para poder bajar a través de ella y tener acceso directo a las tuberías. La Figura 8 muestra una imagen de la instalación de la cámara en terreno junto con las tuberías en su interior.



Figura 8: Cámara para preservar la implementación instalada en terreno.

### **3. CAPÍTULO III. EXPLORACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN**

#### **3.1 Introducción al capítulo**

El presente capítulo muestra las modelaciones realizadas con el programa computacional EED, las que permiten explorar el potencial de la implementación geotérmica. Se realizan distintos modelos con el fin de abarcar y ver la influencia de diferentes parámetros. Además, a los resultados obtenidos se le aplican los criterios adoptados por el presente trabajo para representar las condiciones de borde especiales de la implementación. Esto permite generar una estrategia de modelación para poder diseñar implementaciones con condiciones de borde particulares.

#### **3.2 Diseño de instalaciones geotérmicas mediante EED**

Como ya se mencionó, el software computacional EED ha sido ampliamente validado para el diseño de pozos intercambiadores acoplados a bombas de calor (Hellström et al., 1997; Acuña et al., 2012). Su fácil uso y cortos tiempos de cálculo lo hacen una herramienta ideal para el diseño de este tipo de instalaciones. La Tabla 3 muestra un resumen de los aspectos y características de los modelos realizados con EED.

Tabla 3: Características de modelos en EED.

Modelación en EED	
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo ampliamente validado y documentado</li> <li>- Cuenta con una gran base de datos de variadas configuraciones y g-functions, lo que permite diseñar distintos tipos de instalaciones, considerando la interacción entre pozos</li> <li>- Permite hacer análisis de costos</li> <li>- Entrega el comportamiento de la instalación en el largo plazo</li> </ul>
Principales parámetros de entrada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propiedades térmicas del suelo (tiene una base de datos con valores característicos)</li> <li>- Características y distribución de los intercambiadores y propiedades de las tuberías y del fluido transportador de calor</li> <li>- Cargas de la edificación (tanto base como peak)</li> <li>- Periodo de simulación</li> </ul>
Solución y parámetros de salida	<p>Hay dos fórmulas de realizar los cálculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cálculo de la temperatura media del fluido con una carga y distribución dada</li> <li>- Cálculo del largo requerido del pozo para una temperatura máxima y mínima dada</li> </ul> <p>- Entrega de resultados en forma de texto y gráficos</p>

### 3.3 Descripción de la modelación

Los principales componentes de la modelación realizada con el software EED para la implementación geotérmica del edificio Beauchef 851 se resumen en la Figura 9, la cual muestra un diagrama con los parámetros de entrada y criterios de modelación utilizados.

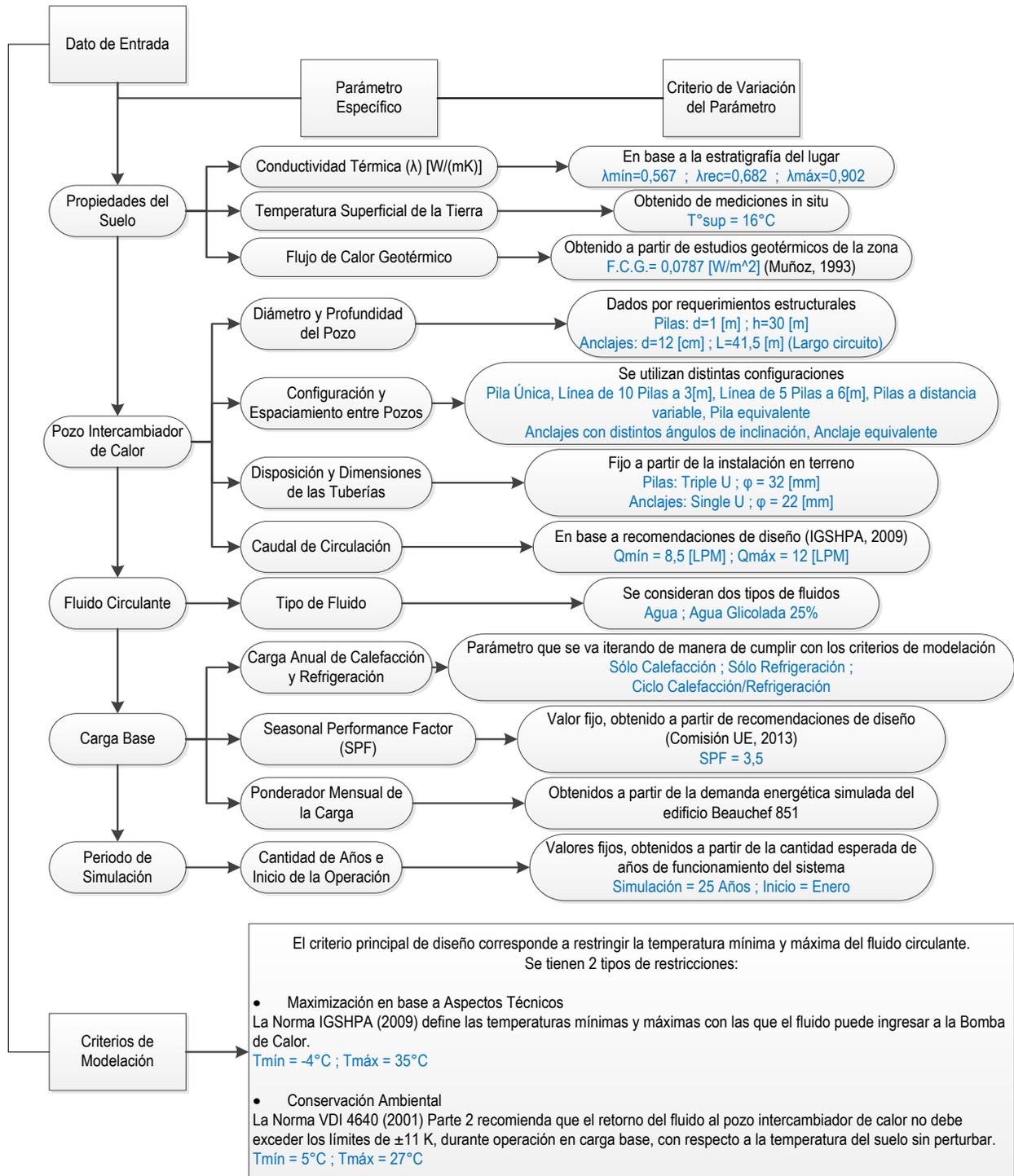


Figura 9: Resumen de parámetros de modelación utilizados.

### 3.3.1 Datos de entrada de la actual implementación

Como se mencionó, se busca conocer la influencia de los distintos parámetros relacionados a la implementación geotérmica en el potencial de esta. Para ello, se realizan modelaciones variando los datos de entrada en base a los distintos casos posibles.

- Conductividad térmica

La base de datos del software EED entrega valores mínimos, recomendados y máximos para distintos tipos de suelos existentes. Ahora bien, del estudio geotécnico realizado en el sector (Pilotes Terratest S.A., 2009) se puede ver que el suelo no es uniforme, ya que presenta horizontes de suelo de diferente composición. Se realiza entonces una ponderación que permita considerar los distintos suelos presentes en el caso de estudio y así obtener una conductividad térmica efectiva que represente de mejor manera la situación presente en terreno. La Figura 10 muestra la estratigrafía del suelo en el que se emplaza el proyecto Beauchef 851.

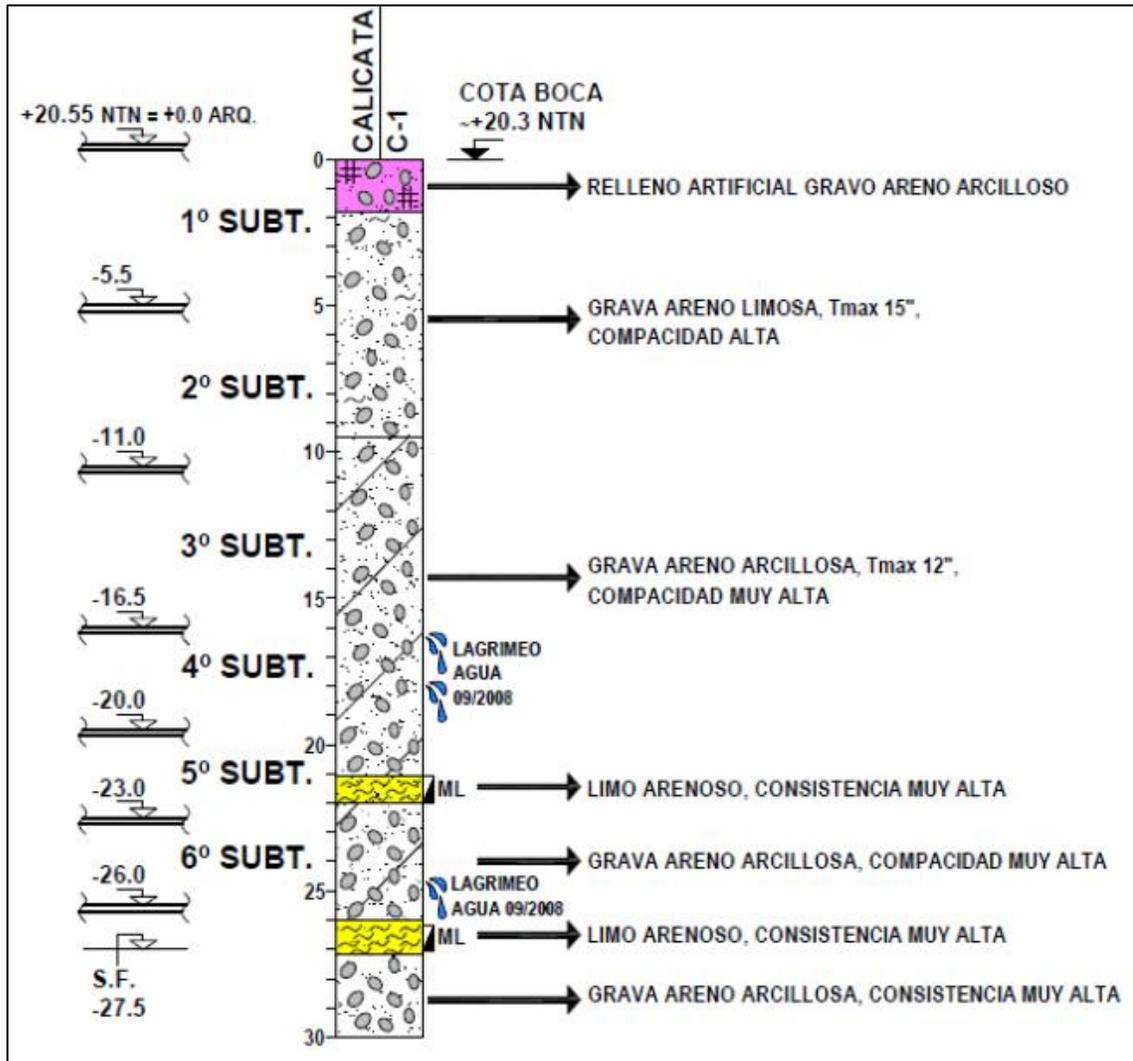


Figura 10: Estratigrafía del suelo del proyecto Beauchef 851 (Pilotes Terratest S.A., 2009).

Se tiene entonces que, mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) de la AASHTO, se obtiene una conductividad térmica mínima, recomendada y máxima para cada estrato, parámetros que posteriormente se ponderan por la altura del horizonte correspondiente en base a la profundidad total de la excavación, que en este caso es de 30 [m]. Se obtiene entonces una conductividad térmica mínima, recomendada y máxima efectiva para el suelo en el cual se emplaza la implementación, lo que permite conocer la influencia de la calidad térmica del suelo en el desempeño del sistema geotérmico implementado.

Los valores obtenidos son:

Conductividad térmica mínima = 0,567 [W/mK]

Conductividad térmica recomendada = 0,682 [W/mK]

Conductividad térmica máxima = 0,902 [W/mK]

- Temperatura superficial de la tierra

Mediciones realizadas en el sector (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012) permiten conocer la temperatura superficial del suelo en el cual se encuentran las pilas y anclajes implementados. La Figura 6 muestra que bajo cierta profundidad el suelo mantiene una temperatura constante. Cabe destacar que los datos correspondientes al mes de Septiembre del 2013 no son tomados en cuenta ya que se alejan de lo esperado, lo que se explica por los trabajos realizados en el sector debido a la construcción de drenes de aguas lluvias y que alteran los resultados obtenidos.

Se tiene entonces que la temperatura superficial del suelo corresponde a 16°C.

- Flujo de calor geotérmico

Estudios realizados por Muñoz and Hamza (1993) entregan el valor de este parámetro, el cual es de 0,0787 [ $W/m^2$ ] para el sector de Santiago.

- Diámetro y profundidad del pozo

Estos parámetros se encuentran dados según requerimientos estructurales, ya que tanto las pilas como los anclajes tienen como principal objetivo generar un sostenimiento del suelo, lo que genera que estos tengan ciertas dimensiones específicas. Ahora bien, cabe mencionar que este parámetro igualmente será variado en una de las modelaciones, con el fin de observar que impacto genera esto en el desempeño térmico de los pozos, principalmente para el caso de los anclajes.

Los valores definidos por requerimientos estructurales son:

Diámetro Pila = 1 [m]; Profundidad Pila = 30 [m]

Diámetro Anclajes = 12 [cm]; Largo Circuito = 41,5 [m] (suma de los niveles de anclajes)

- Configuración y espaciado entre pozos

El sistema de entibación del edificio Beauchef 851 contempla que las pilas se encuentren distanciadas a 3 [m] entre sí. Ahora bien, se utilizan varias configuraciones en base a lo definido por el proyecto de entibación, para así observar el efecto que esto tiene sobre el desempeño del sistema, ya que estudios muestran que la interacción entre pozos es un factor decisivo en dicho desempeño (Fossa et al., 2009). Se analizan entonces las siguientes configuraciones:

Para las pilas: Pila única, Línea de 10 pilas a 3 [m] de separación, Línea de 5 pilas a 6 [m] de separación, Pilas con separación variable (1 [m], 2 [m], 3 [m], 4 [m], 5 [m], 6 [m] y 10 [m]), Pila equivalente.

Para los anclajes: Anclajes con distintos ángulos de inclinación (15°, 20°, 25°, 30° y 35°), Anclaje equivalente.

- Disposición y dimensiones de las tuberías

Parámetros que se encuentran fijos en base a la implementación en terreno y a las opciones que entrega el software como posibles configuraciones.

Para las pilas: configuración Triple U, diámetro 32 [mm].

Para los anclajes: configuración Single U, diámetro 22 [mm].

- Caudal de circulación

Las recomendaciones de diseño de normas internacionales (IGSHPA, 2009) indican un rango de valores de caudal por pozo. Esta misma norma además indica que el flujo turbulento maximiza la capacidad de transferir calor del fluido, por lo que es importante ver el efecto del régimen de circulación en el desempeño de la implementación.

Se tiene entonces los siguientes valores:

$$Q_{\text{mín}} = 8,5 \text{ [L/min]}$$

$$Q_{\text{máx}} = 12 \text{ [L/min]}$$

- Tipo de fluido

Con el objetivo de conocer la influencia del tipo de fluido en el desempeño del sistema, se consideran dos opciones. En primer lugar, Agua Común, que además será el fluido utilizado para realizar las mediciones en terreno con el TRT. Se utilizará también Agua con anticongelante (Glicol al 25%), que es típicamente usada para evitar el congelamiento del fluido en zonas muy frías donde los requerimientos de calefacción impliquen que la temperatura de dicho fluido circulante llegue por debajo de los 0°C.

- Carga anual de calefacción y refrigeración tomadas por el intercambiador

Este parámetro se va iterando de manera de cumplir con los criterios de modelación que serán explicados en el apartado 3.3.2.

- *Seasonal Performance Factor (SPF)*

El SPF corresponde al factor de rendimiento medio estacional estimativo de una bomba de calor. En otras palabras, el SPF es la relación entre la energía utilizable entregada por el sistema y la cantidad de energía necesaria para obtenerla.

Con el objetivo de simplificar el análisis, un valor constante de  $SPF = 3,5$  es utilizado tanto para calefacción como refrigeración. Dicha valor es escogido en base a recomendaciones internacionales de diseño (Comisión UE, 2013).

- Ponderador mensual de la demanda energética

Este dato define cómo se distribuye la carga anual tomada por el sistema, tanto de calefacción como de refrigeración, en cada uno de los meses del año. Dicha distribución se obtiene a partir de la modelación energética realizada por IDIEM como parte del proyecto de climatización del edificio. Las columnas denominadas “%Respecto al total” de la Tabla 4 muestran la distribución mensual de las cargas de calefacción y refrigeración que es ingresada al software EED, distribución que aparece graficada en la Figura 11. Cabe destacar que el mes de Febrero no presenta demanda energética ya que el edificio no se encuentra operativo en dicho mes.

Tabla 4: Valores de demanda térmica Beauchef 851 (IDIEM, 2013).

Date/Time	Demanda de Calefacción		Demanda de Refrigeración	
	[kWh]	% Respecto al total	[kWh]	% Respecto al total
Enero	228	0,04%	288.912	32,05%
Febrero	-	0,00%	-	0,00%
Marzo	3.872	0,66%	146.619	16,26%
Abril	20.387	3,49%	55.565	6,16%
Mayo	76.071	13,02%	14.737	1,63%
Junio	106.838	18,29%	2.399	0,27%
Julio	174.608	29,89%	1.108	0,12%
Agosto	115.039	19,70%	4.376	0,49%
Septiembre	55.667	9,53%	10.349	1,15%
Octubre	26.236	4,49%	44.725	4,96%
Noviembre	4.662	0,80%	126.496	14,03%
Diciembre	481	0,08%	206.168	22,87%
Anual	584.088	100%	901.454	100%

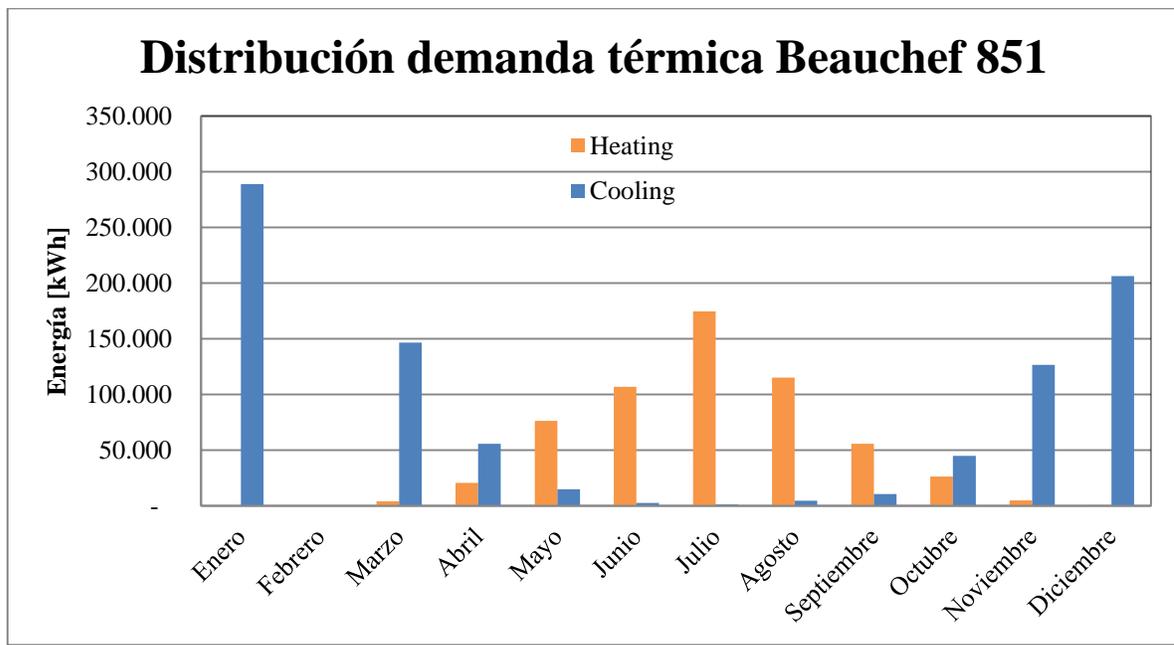


Figura 11: Distribución anual demanda térmica Beauchef 851 (IDIEM, 2013).

- Cantidad de años de operación y mes de inicio

Estos valores se dejan fijos en base a la cantidad esperada de años de funcionamiento del sistema implementado.

Periodo de simulación = 25 años.

Mes de inicio de la simulación = Enero.

### 3.3.2 Criterio de modelación

Como se mencionó anteriormente, el software EED entrega como resultado de la modelación la temperatura media de circulación del fluido para los meses del año a lo largo del periodo de simulación. Esta temperatura es calculada en base a los parámetros de entrada expuestos en la sección anterior. Ahora bien, como en este caso se tiene una geometría y configuración dadas por requerimientos estructurales, la metodología de modelación consiste en variar la carga tomada por los intercambiadores (en este caso pilas y anclajes) para que esta se ajuste a sus dimensiones dadas y a las restricciones de temperatura de circulación mínimas y máximas impuestas para el edificio en estudio. Cabe mencionar además que para las modelaciones realizadas se considera la demanda energética base del edificio, dejando de lado las cargas *peak* y la demanda por agua caliente domiciliaria.

El presente trabajo estudia dos opciones posibles para los límites de temperatura del fluido circulante. Estas dos opciones definen los criterios de modelación.

- Maximización en base a aspectos técnicos

La Norma IGSHPA (2009) define las temperaturas mínimas y máximas con las que el fluido transportador de calor puede ingresar a la bomba de calor. Estas temperaturas son definidas en base a los límites de funcionamiento de una bomba de calor estándar.

Temperatura mínima de circulación =  $-4^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura máxima de circulación =  $35^{\circ}\text{C}$ .

Cabe mencionar que para las modelaciones realizadas con Agua Común como fluido circulante, la temperatura mínima no puede llegar a los  $-4^{\circ}\text{C}$ , por lo que en ese caso la temperatura mínima escogida es de  $3^{\circ}\text{C}$ , temperatura que asegura que el fluido no llegue al punto de congelación.

- Conservación ambiental

La Norma VDI 4640 (2001) recomienda que la temperatura del fluido circulante por el pozo intercambiador de calor no exceda los límites de  $\pm 11^{\circ}\text{C}$ , durante operación en carga base, con respecto a la temperatura del suelo sin perturbar, la que en este caso es de  $16^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura mínima de circulación =  $5^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura máxima de circulación =  $27^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.3 Condiciones de borde

El presente trabajo analiza una implementación geotérmica integrada constructivamente que presenta condiciones de borde necesarias de considerar a la hora de analizar los resultados. Se adopta entonces una metodología que permita considerar las condiciones de borde de las pilas (parcialmente expuestas al foso de luz y a los subterráneos) y de los anclajes (inclinados y a diferentes profundidades).

- Pilas

Para el caso de las pilas, es necesario saber cuánto afecta el hecho de que una parte de ellas esté en contacto directo con el muro perimetral del edificio, el cual a su vez da hacia el patio inglés (condiciones ambientales) en su tramo superior y hacia los subterráneos (condiciones a estudiar) en su tramo inferior, tal como muestra la Figura 3. Para ello, es necesario conocer las dimensiones del bulbo de temperatura que se genera alrededor del pozo cuando este es utilizado para generar intercambio de calor. En otras palabras, se busca conocer cuánto suelo alrededor de la pila cambia su temperatura. En función de la cantidad de bulbo que traspase el muro perimetral y que por ende quede expuesto tanto al patio inglés como a los subterráneos, se hace una ponderación, considerando una pérdida de carga proporcional a la parte del bulbo que pasa del muro perimetral.

Se realizan entonces modelaciones en las que se varía solamente la separación entre dos pozos de las mismas características. La Figura 12 muestra un diagrama que detalla los parámetros de entrada para estas modelaciones.

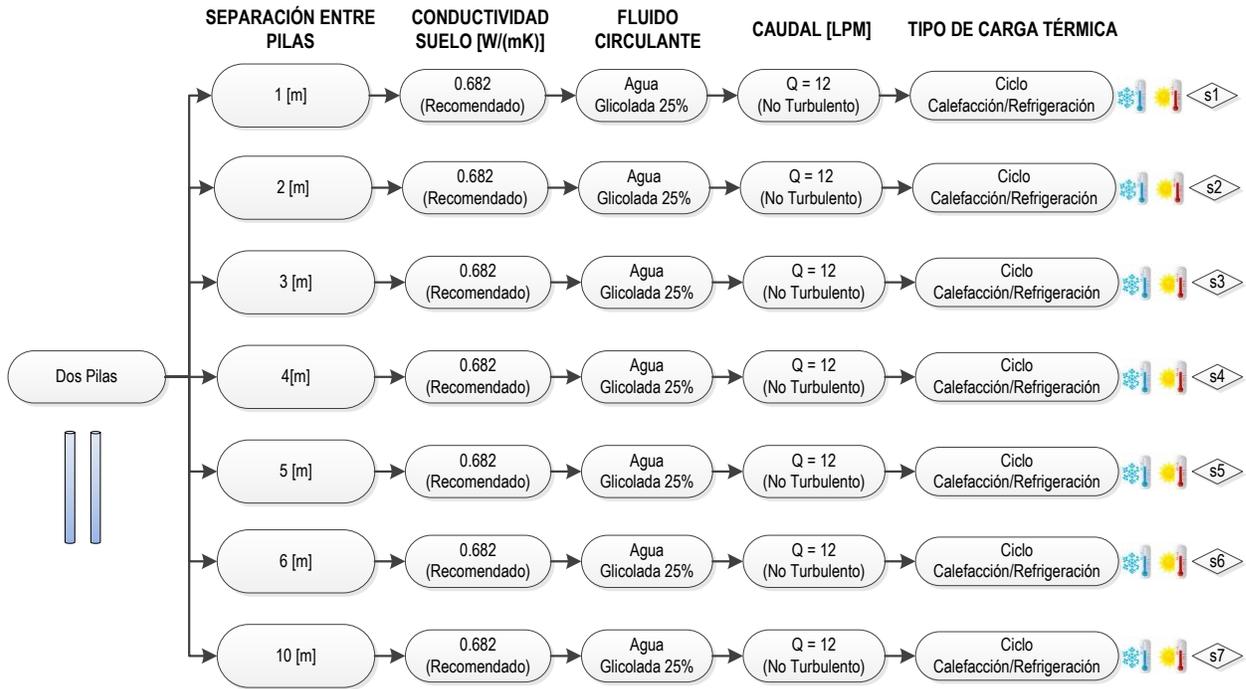


Figura 12: Diagrama de modelos realizados en EED con separación variable.

A partir de los resultados obtenidos de estas modelaciones se genera el gráfico mostrado en la Figura 13, donde se aprecia la carga tomada por estas dos pilas en función de las distintas separaciones consideradas entre ellas.

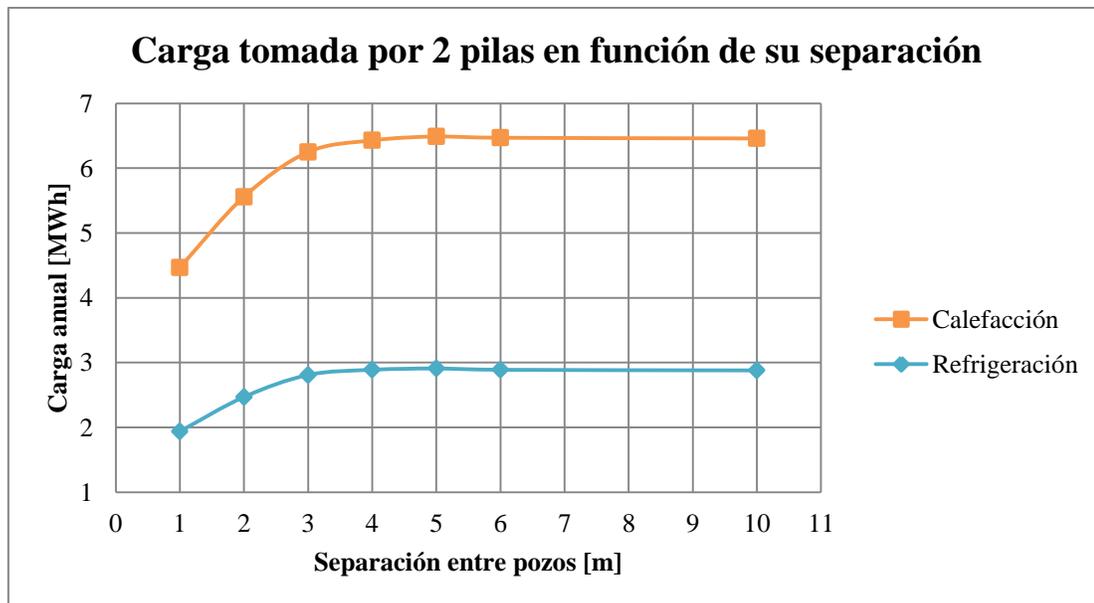


Figura 13: Carga anual tomada por dos pilas en función de la separación entre ellas.

En la Figura 13 se puede ver cómo hay una influencia considerable de la interacción entre pozos hasta los 3 [m] de separación, a partir de los cuales ya no se aprecia diferencia en la carga tomada por ambos pozos para separaciones mayores. Se puede concluir entonces que el bulbo de temperatura tiene un radio de 1,5 [m] desde el centro de la pila. Lo anterior se esquematiza en la Figura 14 donde se puede ver el bulbo de temperatura generado por dos pozos (pilas) separados a 3 [m] entre sí, que corresponde al caso presente en terreno.

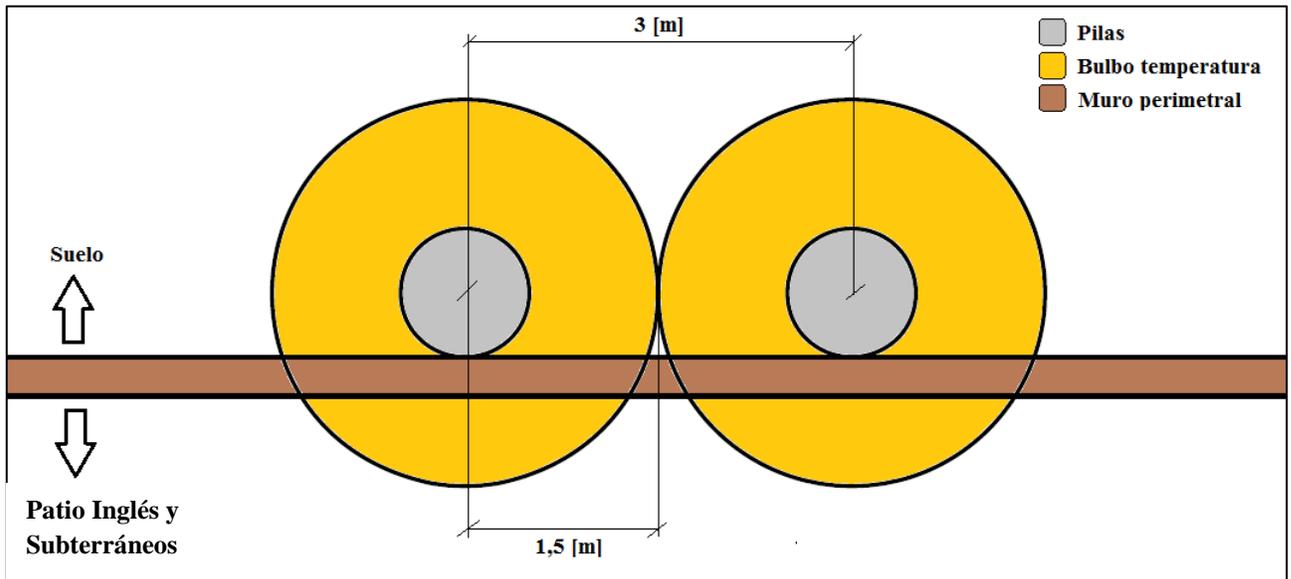


Figura 14: Dimensión del bulbo de temperatura que se genera en las pilas.

Se tiene entonces que la parte del bulbo de temperatura que queda en el patio inglés y en los subterráneos se considera como pérdida de la carga tomada por la pila. Es decir, la carga tomada por la pila, tanto de calefacción como refrigeración, tiene que ser ponderada por el porcentaje efectivo del bulbo que toma el suelo para así considerar la condición de borde. Cabe mencionar que modelaciones previas, donde se modela una pila rodeada de aire, permiten concluir que estas no toman carga, razón por la que se considera que dicha carga se pierde en la parte del bulbo que queda más allá del muro perimetral.

Por la geometría del terreno, hay pilas de entibación que tienen distintos porcentajes de exposición al patio inglés y subterráneos. Se tiene por un lado las pilas que se encuentran en el perímetro del edificio y que son las más comunes. Por otro lado, hay dos tipos de condiciones de borde diferentes presentes en los vértices de la excavación. Estos tres casos mencionados se señalan en la Figura 15.

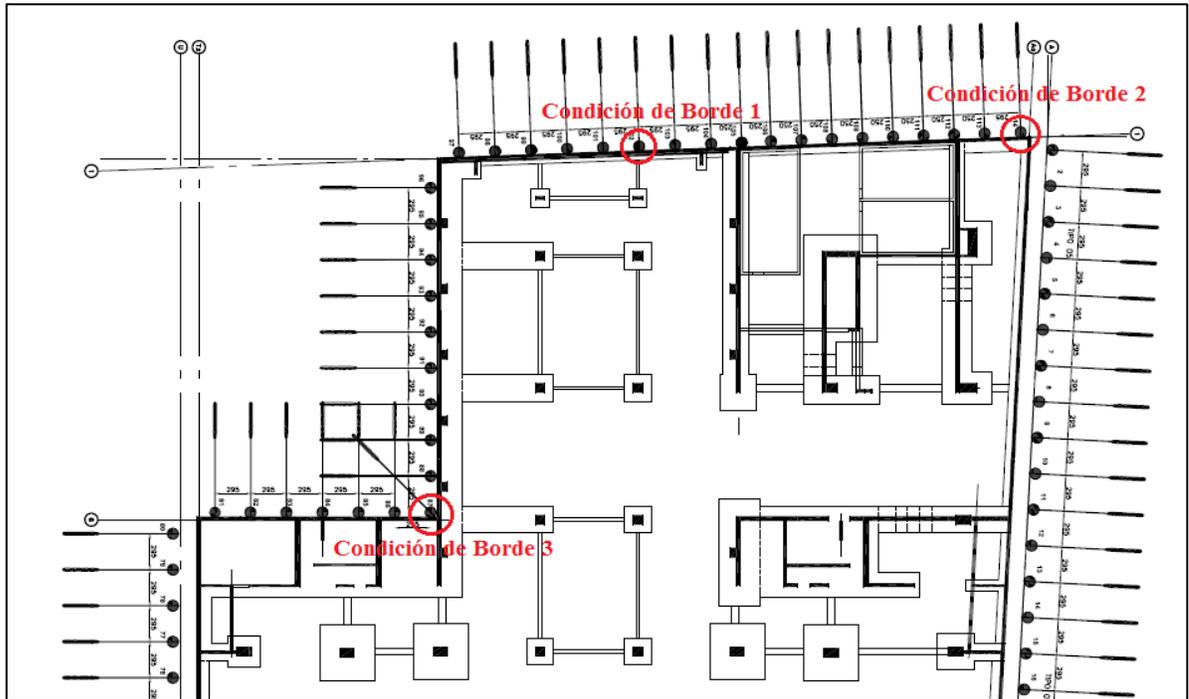


Figura 15: Condiciones de borde de las pilas de Beauchef 851.

- Condición de borde 1

Corresponde al caso más común ya que representa a las pilas que se encuentran a lo largo de los costados de la excavación. En otras palabras, es el caso que considera a todas las pilas que no están en los vértices. Se tiene una pérdida de carga de un 17,74% debido a la exposición del bulbo de temperatura al patio inglés y subtes. La Figura 16 muestra un esquema de este caso.

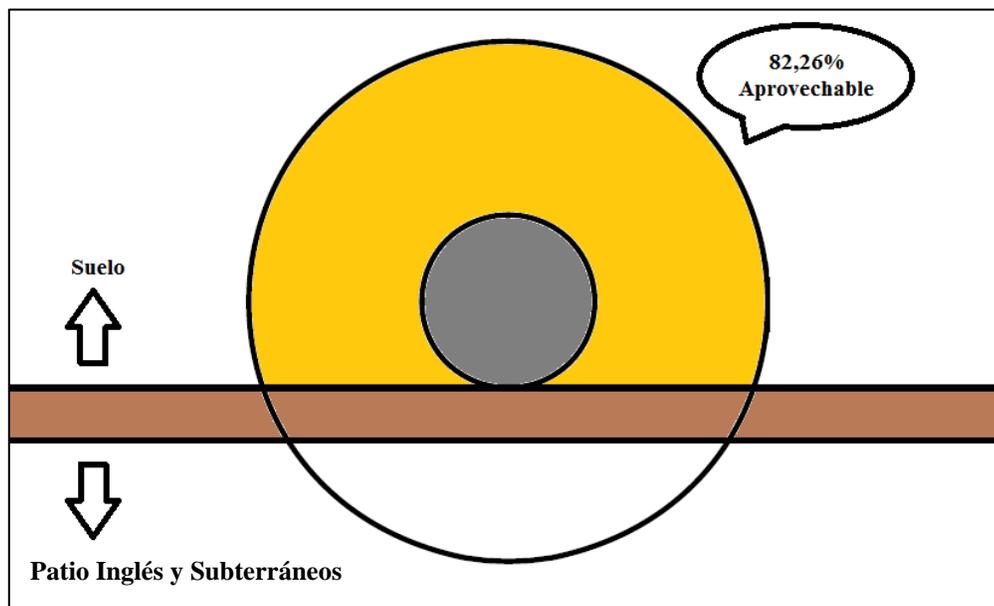


Figura 16: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 1.

- Condición de borde 2

Representa el caso de una pila ubicada en uno de los vértices de la excavación. Este caso corresponde al más favorable, ya que la cantidad de bulbo de temperatura que queda tras el muro perimetral es la menor debido al ángulo interior del vértice en el que se encuentra. La pérdida de carga en este caso es de un 8,05%. La Figura 17 esquematiza este caso.

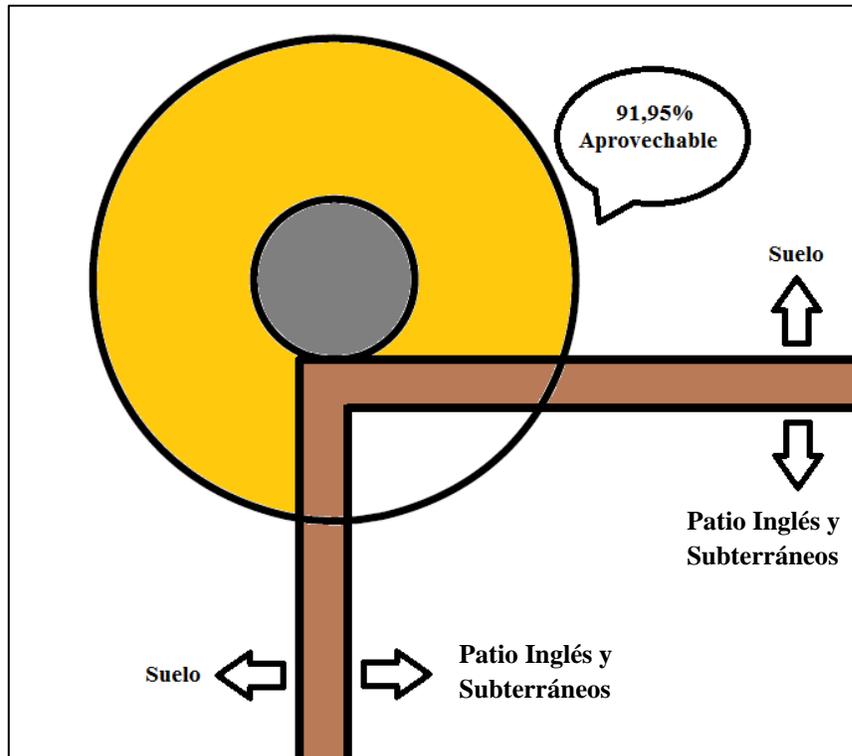


Figura 17: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 2.

- Condición de borde 3

Al igual que el caso anterior, corresponde a pilas ubicadas en los vértices, aunque en este caso, y debido al ángulo interior de dicho vértice, la cantidad de bulbo de temperatura que queda tras el muro perimetral es la mayor de los 3 casos abordados. Representa la pila con condiciones de borde más desfavorables, ya que la pérdida de carga es de un 33,68%. La Figura 18 representa este caso.

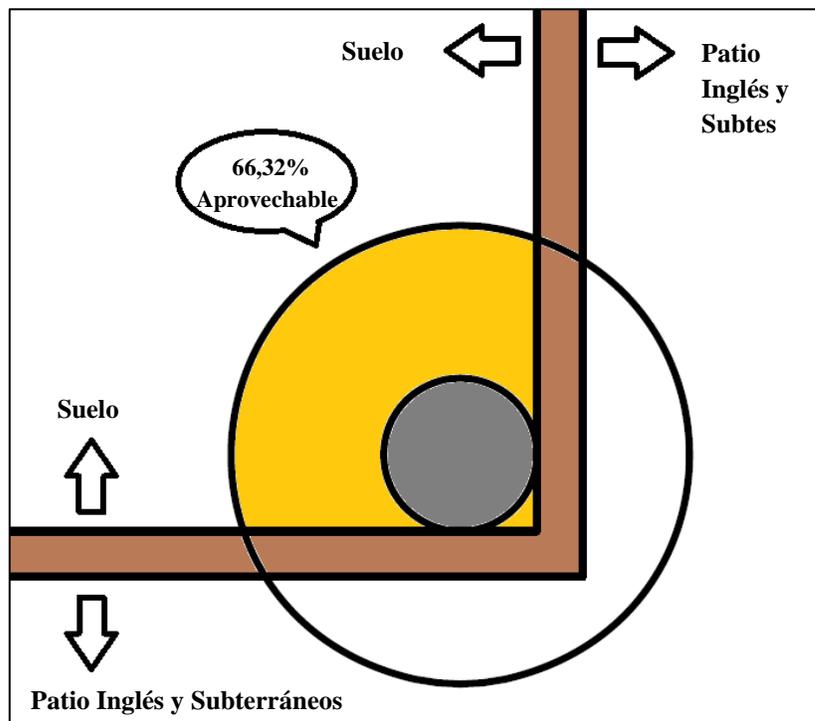


Figura 18: Esquema del caso correspondiente a la condición de borde 3.

- Anclajes

Con respecto a los anclajes, hay que conocer la influencia que tienen los dos aspectos que los definen. Primero, el hecho de que estos sean inclinados ya que el software EED sólo permite modelar pozos verticales. Se realiza entonces una proyección vertical del pozo en base a su inclinación y a su punto medio (Sanner, 2010), obteniéndose la profundidad efectiva de este, cómo se muestra en la Figura 19.

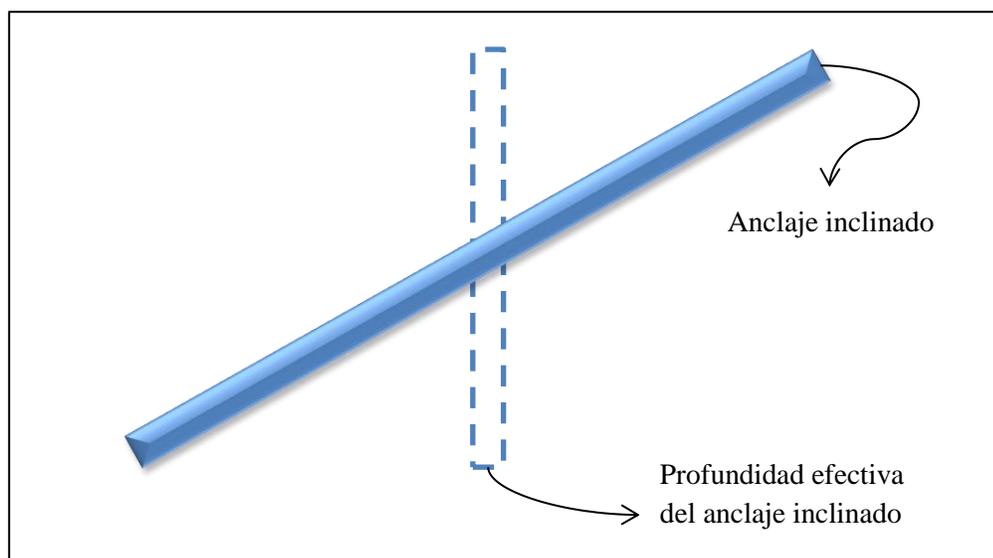


Figura 19: Proyección vertical del anclaje entrega su profundidad efectiva.

El segundo aspecto corresponde al efecto que genera que las tres líneas de anclaje que componen un circuito se encuentran a distinta profundidad entre ellas, como se aprecia en la Figura 3. Se modela cada anclaje como si este fuera un pozo que llega hasta la superficie y se le resta el aporte que entregaría la parte superior que estaría expuesta hacia el patio inglés y los subterráneos. Esto se hace para cada línea de anclaje, para luego sumar el aporte total de cada uno y así obtener la carga total tomada por el circuito. La Figura 20 esquematiza lo mencionado.

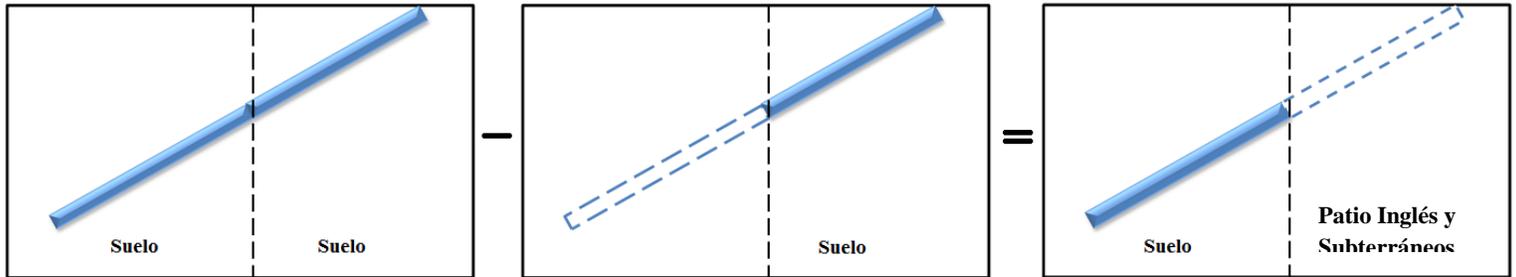


Figura 20: Consideración realizada para considerar la distinta profundidad de cada anclaje.

### 3.4 Modelos realizados y resultados obtenidos

Se realizan distintos tipos de modelos con el fin de ver la influencia de los diferentes parámetros sobre el desempeño del sistema. A continuación se procede a detallar cada uno de los tipos de modelaciones realizadas así como los resultados obtenidos.

#### 3.4.1 Pila patrón

Modelación que se realiza para ver el efecto que genera un ciclo de descarga/carga del suelo (calefacción/refrigeración), versus un ciclo de sólo carga (refrigeración) o sólo descarga (calefacción) del suelo. Se realizan entonces 3 modelos donde lo que se varía corresponde al tipo de carga térmica tomada, dejando los otros parámetros fijos. Cabe mencionar que el criterio de modelación utilizado en este caso corresponde a maximización en base a aspectos técnicos. La Figura 21 muestra un diagrama que resume las características que los modelos realizados.

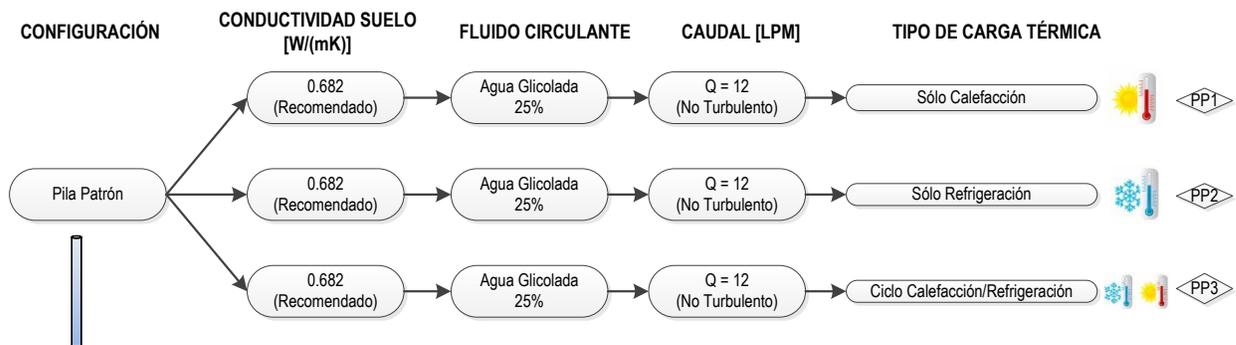


Figura 21: Diagramas de modelos de Pila patrón realizados en EED.

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos a partir de las modelaciones denominadas de pila patrón.

Tabla 5: Resultados obtenidos de las modelaciones de pila patrón.

Pila Patrón					
Modelación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Carga Anual [MWh]	
				Calefacción	Refrigeración
PP1	0,682	Agua Glicolada	12	4,50	0
PP2	0,682	Agua Glicolada	12	0	1,84
PP3	0,682	Agua Glicolada	12	5,51	2,47
Aumento debido al ciclo calefacción/refrigeración				22%	34%

Se puede ver el aumento que genera el ciclo calefacción/refrigeración en la capacidad de tomar carga por parte de las pilas, aumentando en un 22% para el caso de la calefacción y en un 34% para el caso de la refrigeración. Cabe mencionar que a estos valores aún no se les ha aplicado la ponderación correspondiente a la condición de borde de las pilas

#### 3.4.2 Pilas distintas configuraciones (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)

Se realizan 36 modelos que tienen como objetivo ver la influencia de los distintos parámetros en la capacidad de tomar carga por parte de las pilas implementadas. Se varían los parámetros correspondientes a configuración, conductividad del suelo, fluido circulante y caudal según lo expuesto en la sección 3.3.1 dejando fijo el tipo de carga térmica tomada, correspondiente al ciclo calefacción/refrigeración, ya que esto fue abarcado en la sección anterior. Cabe destacar que estos modelos han sido realizados siguiendo el criterio de maximización en base a aspectos técnicos.

Los 36 modelos son separados en tres grupos de 12 modelaciones en base a la configuración utilizada. El primer grupo corresponde a la configuración de pila única, el segundo a la configuración de una línea de diez pilas separadas a tres metros, mientras que el último grupo corresponde a una línea de cinco pilas separadas a seis metros.

En cada grupo de modelaciones se ha marcado de color anaranjado el modelo que se ha realizado utilizando parámetros recomendados por normas internacionales (para el caso del fluido circulante y su caudal) y que se acerca a lo encontrado en terreno para el caso de la conductividad del suelo.

Los valores de carga anual tomada obtenidos mediante estos modelos no han sido ponderados por la condición de borde que presentan las pilas, ya que esto se realiza más adelante en el presente capítulo (sección 3.5).

La Figura 22 muestra un diagrama que resume las características de los modelos realizados con la configuración de pila única.

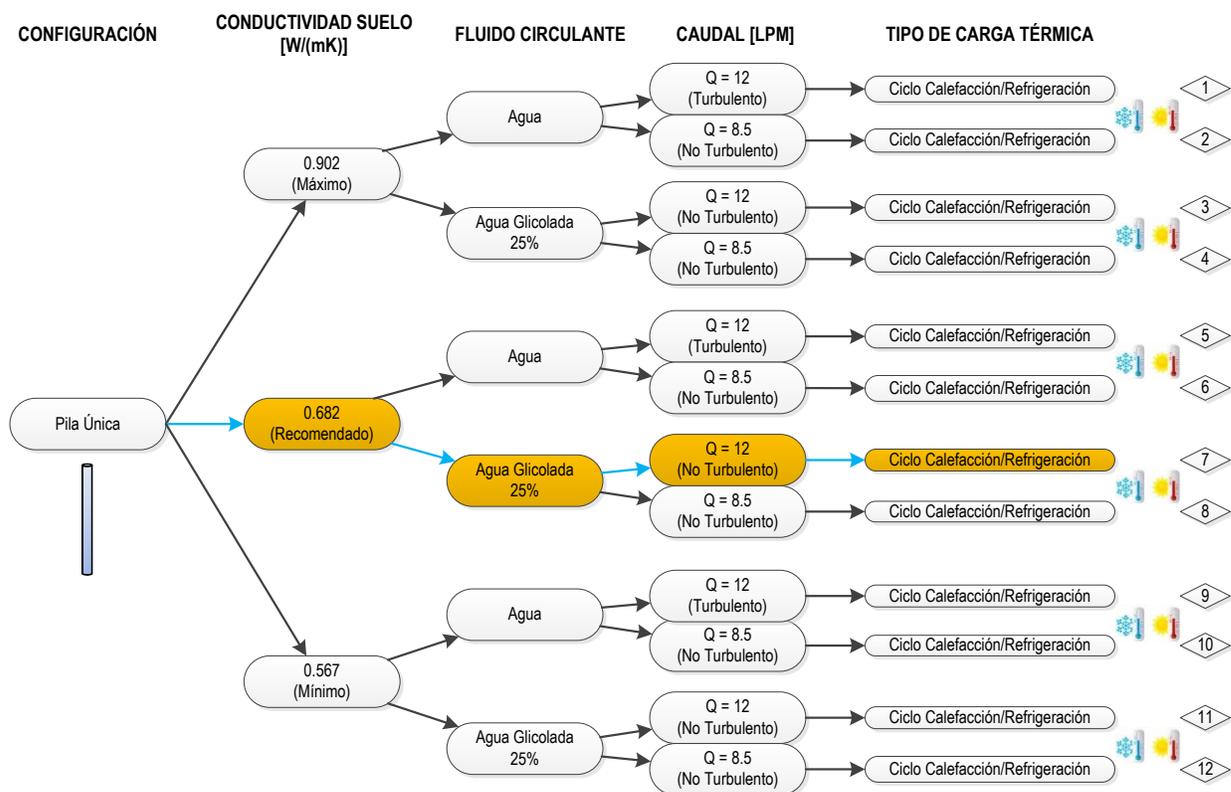


Figura 22: Diagrama de modelos de pila única realizados en EED.

Los resultados obtenidos de estas modelaciones se pueden ver graficados en la Figura 23.

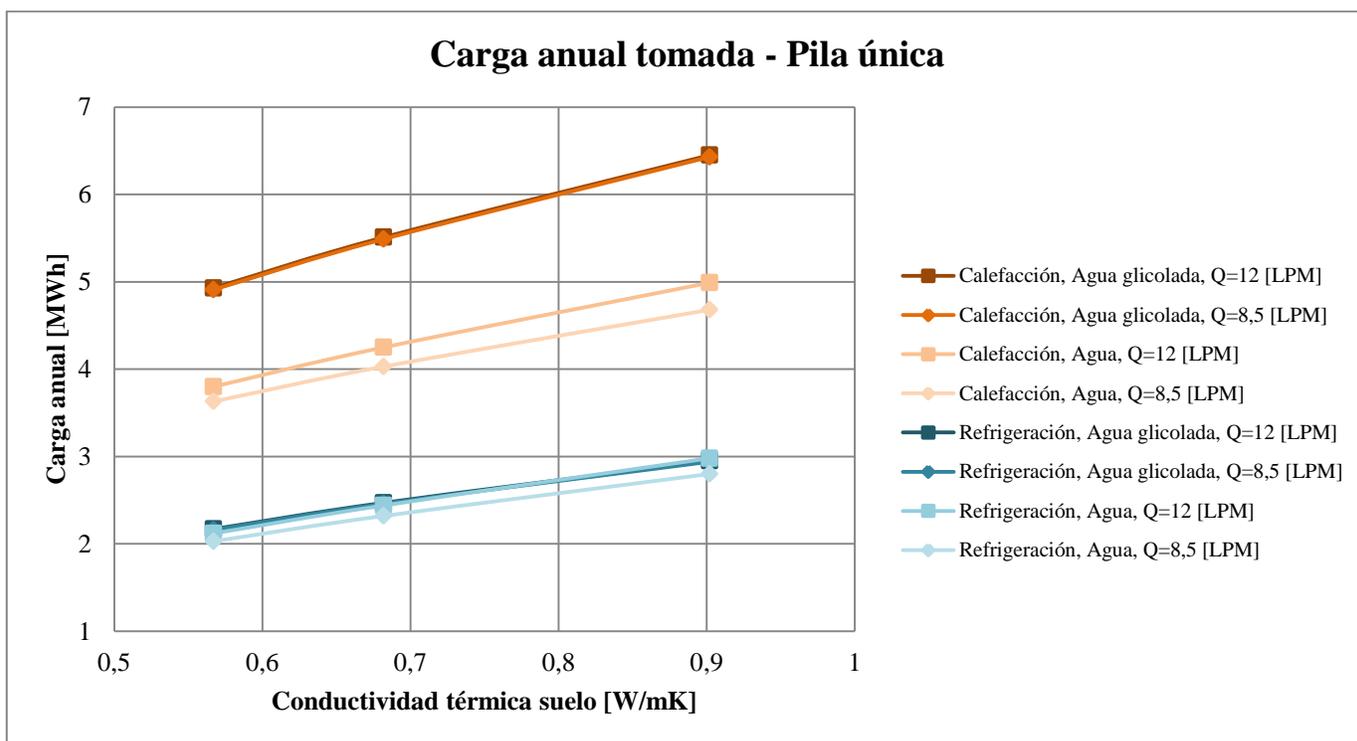


Figura 23: Carga anual tomada por una pila única, modelos 1 al 12.

En primer lugar se puede observar que para cada una de las 12 modelaciones, la pila toma más carga de calefacción que de refrigeración, siendo en promedio el doble la carga de calefacción. Se puede ver además que para el caso de la refrigeración no hay mayor diferencia en la carga tomada por la pila cuando el fluido circulante es agua pura o agua glicolada. Otro aspecto importante corresponde al efecto que genera el caudal de circulación, habiendo una mayor diferencia entre los resultados para el caso en que el fluido circulante es agua pura. Por último, se observa el efecto que genera la conductividad del suelo en la carga anual tomada por la pila, tanto para calefacción como para refrigeración, pudiéndose tomar más carga cuando la conductividad del suelo es mayor.

El detalle de los valores obtenidos para las modelaciones de pila única se puede ver en el Anexo E.

La Figura 24 muestra el diagrama que resume las características de los modelos realizados para la configuración de una línea de 10 pilas separadas a 3 [m], modelos que buscan representar la situación presente en terreno (pilas a tres metros de distancia entre sí).

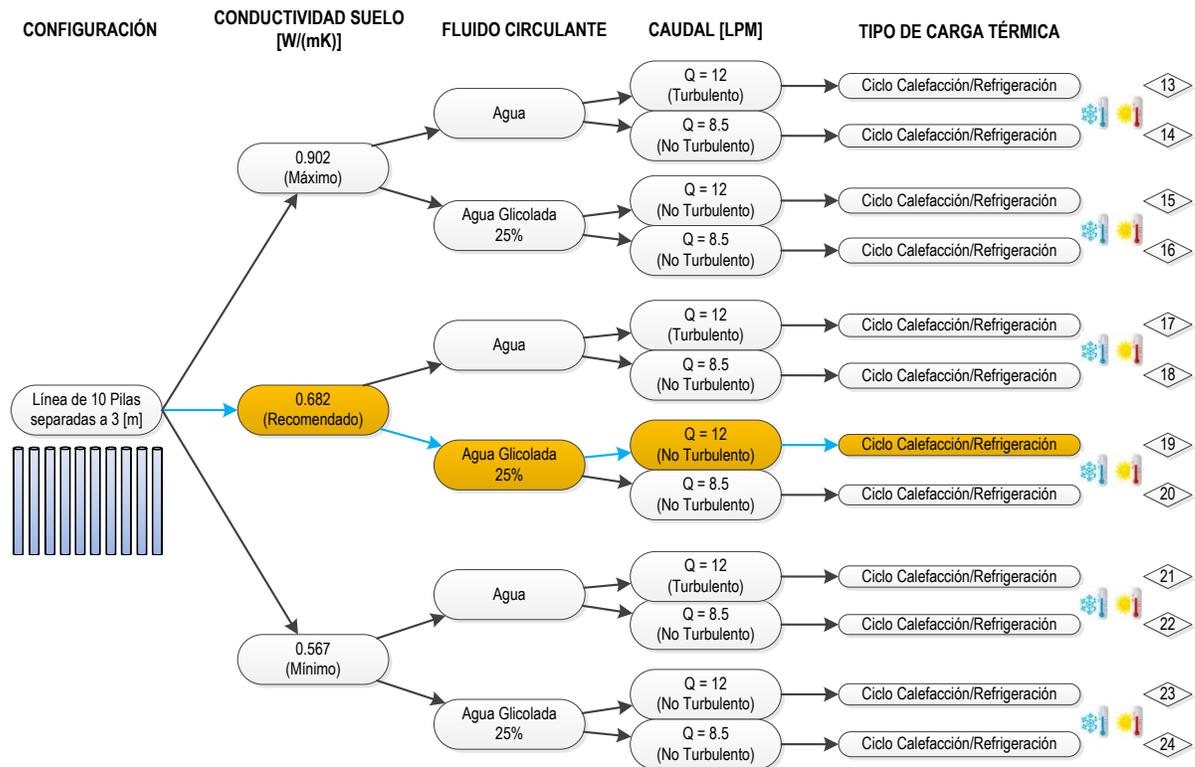


Figura 24: Diagrama de modelos de línea de 10 pilas separadas a 3 [m] realizados en EED.

Los resultados obtenidos a partir de estas modelaciones se muestran graficados en la Figura 25.

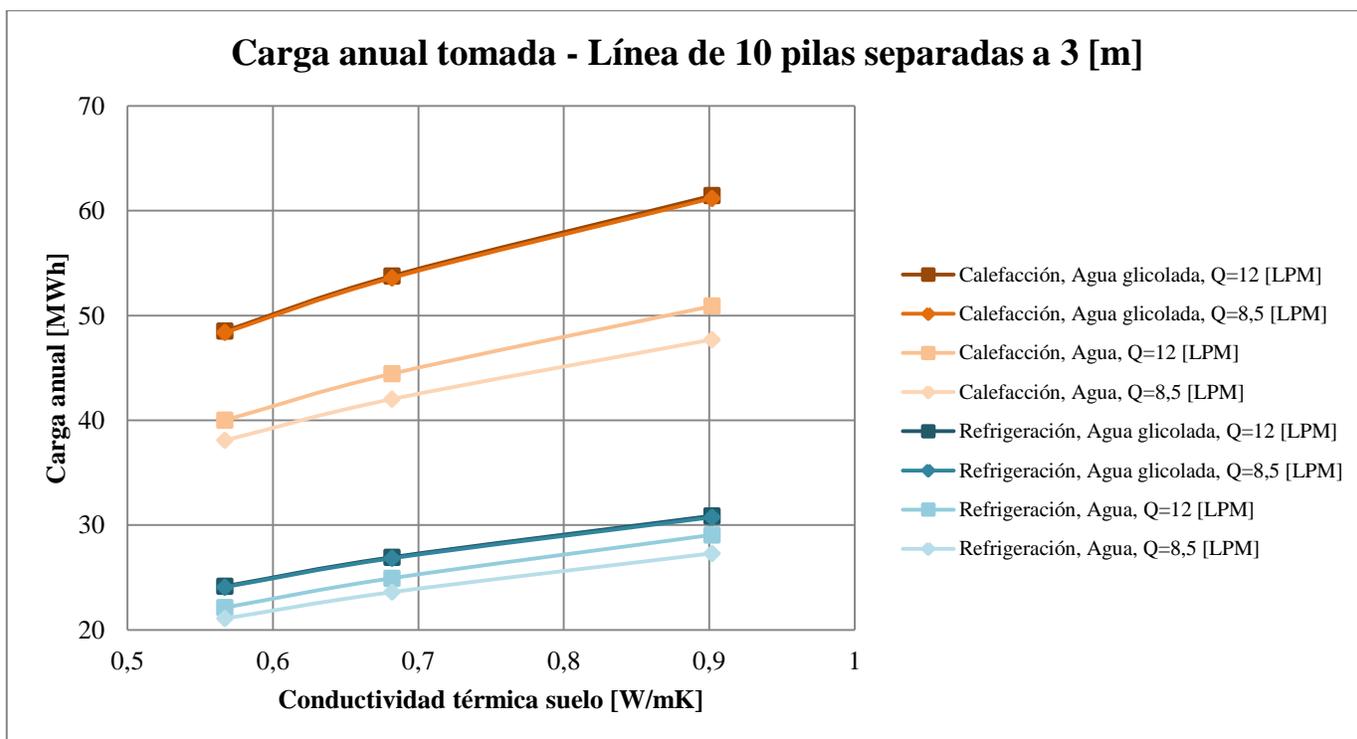


Figura 25: Carga anual tomada por una línea de 10 pilas separadas a 3 [m], modelos 13 al 24.

Al igual que para el caso de la pila única, se observa que la carga de calefacción tomada por la configuración es prácticamente el doble de la carga de refrigeración. Se puede ver además que para los modelos donde el fluido circulante es agua glicolada, no hay diferencia entre la carga tomada, tanto de calefacción como de refrigeración, para los distintos caudales, diferencia que es más notoria cuando el fluido circulante es agua. Por último, hay que notar el hecho de que los valores de carga anual obtenidos en este caso son aproximadamente 10 veces mayores que los resultados obtenidos para el caso de pila única, lo que reafirma el hecho de que no hay mayor interacción entre bulbos de temperatura cuando la separación es de 3 [m].

El detalle de los valores obtenidos para las modelaciones de una línea de 10 pilas separadas a 3 [m] entre sí se puede ver en el Anexo E.

La Figura 26 muestra el diagrama que resume las características de los modelos correspondientes a la configuración de una línea de 5 pilas separadas a 6 [m], que busca representar la implementación en terreno de una pila por medio para ver si hay una mejora respecto de las pilas separadas a 3 [m].

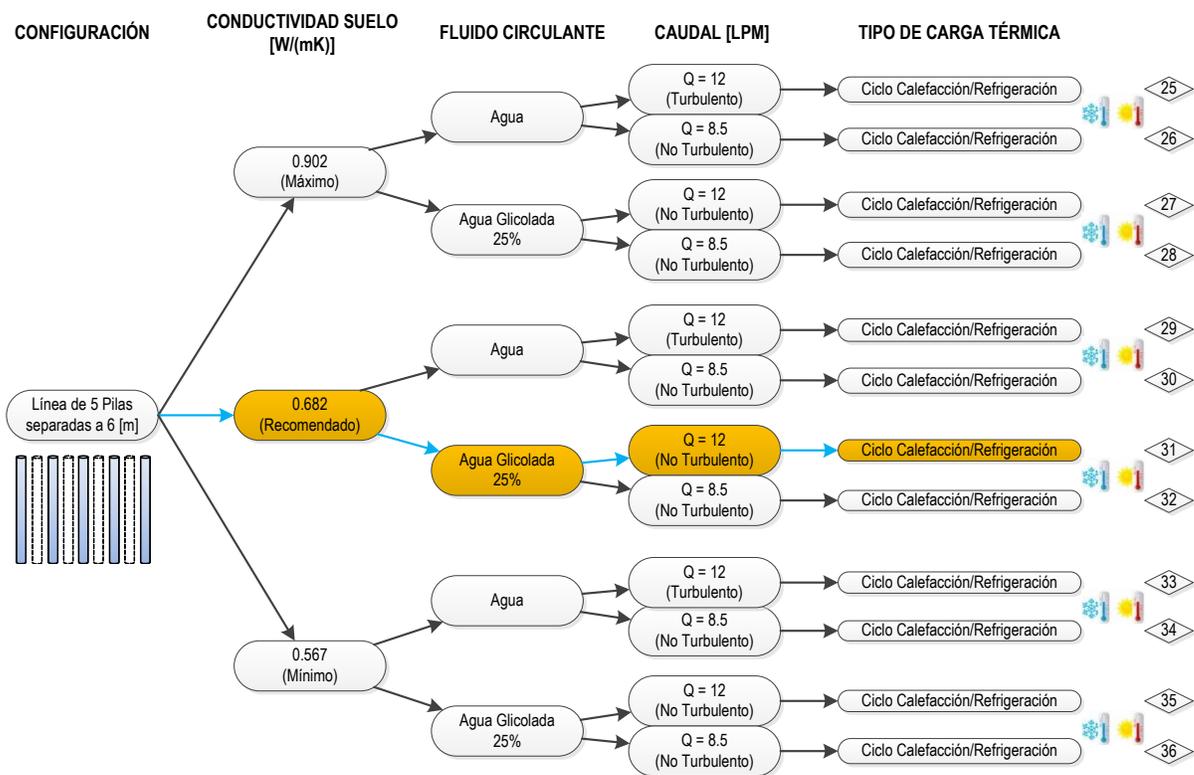


Figura 26: Diagrama de modelos de línea de 5 pilas separadas a 6 [m] realizados en EED.

Los resultados obtenidos de estas modelaciones se ver graficados en la Figura 27.

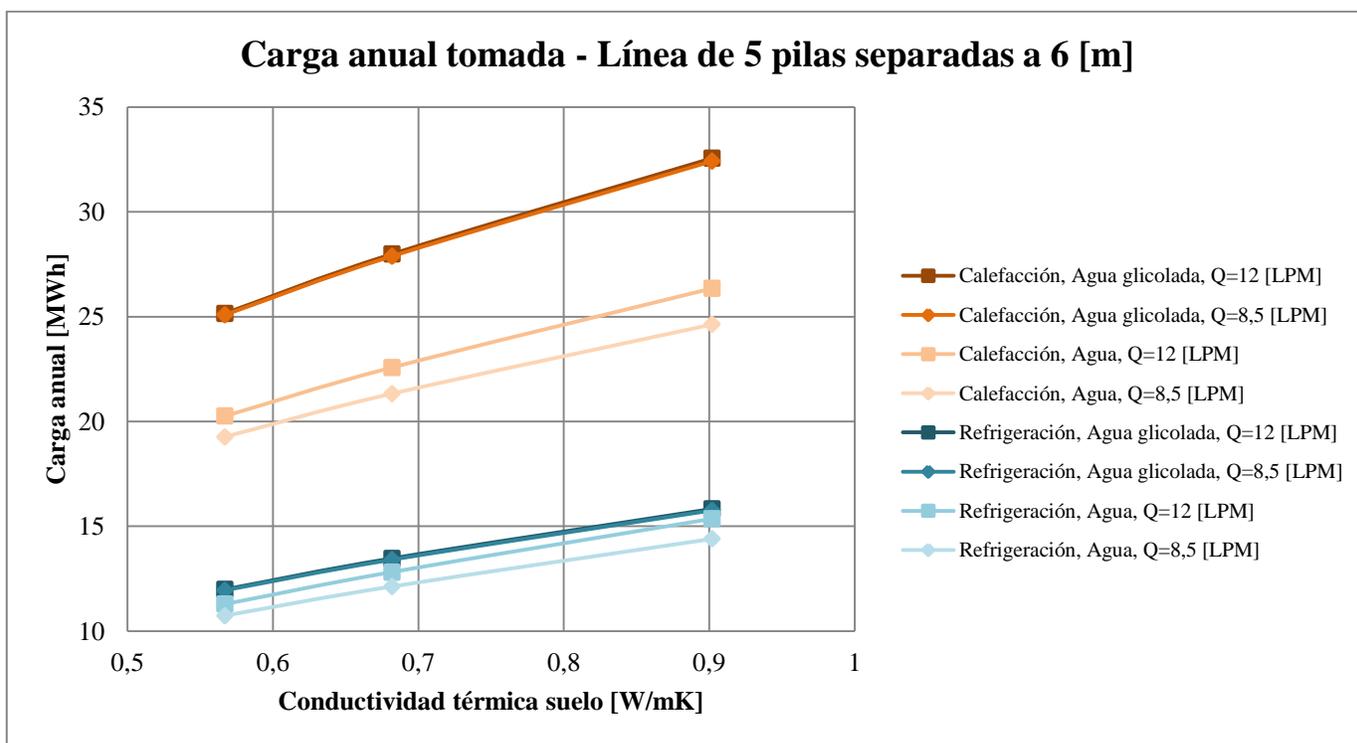


Figura 27: Carga anual tomada por una línea de 5 pilas separadas a 6 [m], modelos 25 al 36.

Gráficamente se puede ver que el comportamiento de las curvas de la Figura 27, que representan los resultados de las modelaciones de una línea de 5 pilas separadas a 6 [m], es similar al caso de una línea de 10 pilas separadas a 3 [m] (Figura 25), teniendo dichas curvas pendientes similares en cada caso. Se observa que la carga tomada por la línea de 5 pilas separadas a 6 [m] corresponde aproximadamente a la mitad de la carga tomada por la línea de 10 pilas separadas a 3 [m], lo que nuevamente reafirma que no hay mayor interacción entre las pilas y que su comportamiento, en cuanto a carga anual tomada, es prácticamente lineal.

El detalle de los valores obtenidos para las modelaciones de una línea de 5 pilas separadas a 6 [m] entre sí se puede ver en el Anexo E.

### 3.4.3 Anclajes distintos ángulos (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)

Se realizan 5 modelos que tienen por objetivo ver la influencia del ángulo de inclinación de los anclajes en la capacidad de tomar carga de estos. Se espera una influencia de dicho ángulo debido a la proyección realizada para llevar a cabo la modelación en el software EED (sección 3.3.3).

El proyecto de entibación (Pilotes Terratest S.A., 2009) muestra que hay distintos ángulos de inclinación posibles, siendo 15° el menor y 35° el mayor. Se realiza entonces una variación gradual de 5° entre estos valores, dejando fijos los parámetros de conductividad del suelo, fluido circulante, caudal y tipo de carga térmica, en base a las modelaciones realizadas y que indican los valores más apropiados de utilizar. Cabe destacar que estos modelos han sido realizados siguiendo el criterio de maximización en base a aspectos técnicos. La Figura 28 muestra un diagrama que resume las características de los modelos, donde ha sido demarcado de color anaranjado el modelo que utiliza parámetros recomendados por normas internacionales (IGSHPA; VDI 4640). En este caso, y a diferencia de lo realizado con las pilas, los resultados obtenidos a partir de estas modelaciones ya se encuentran ponderados por las condiciones de borde

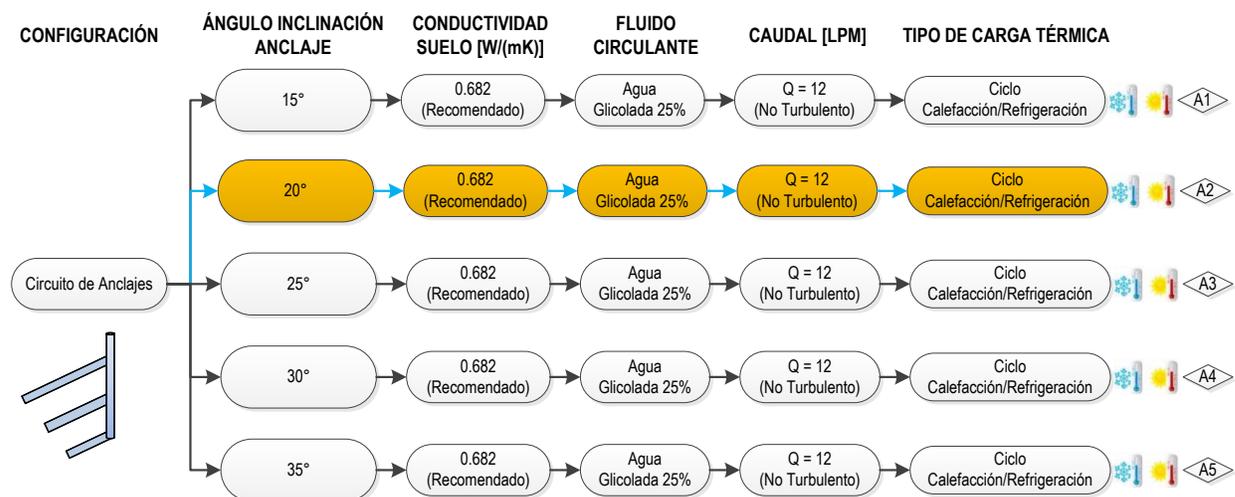


Figura 28: Diagrama de los modelos de anclajes realizados en EED.

Los resultados obtenidos de estas modelaciones se ven graficados en la Figura 29.

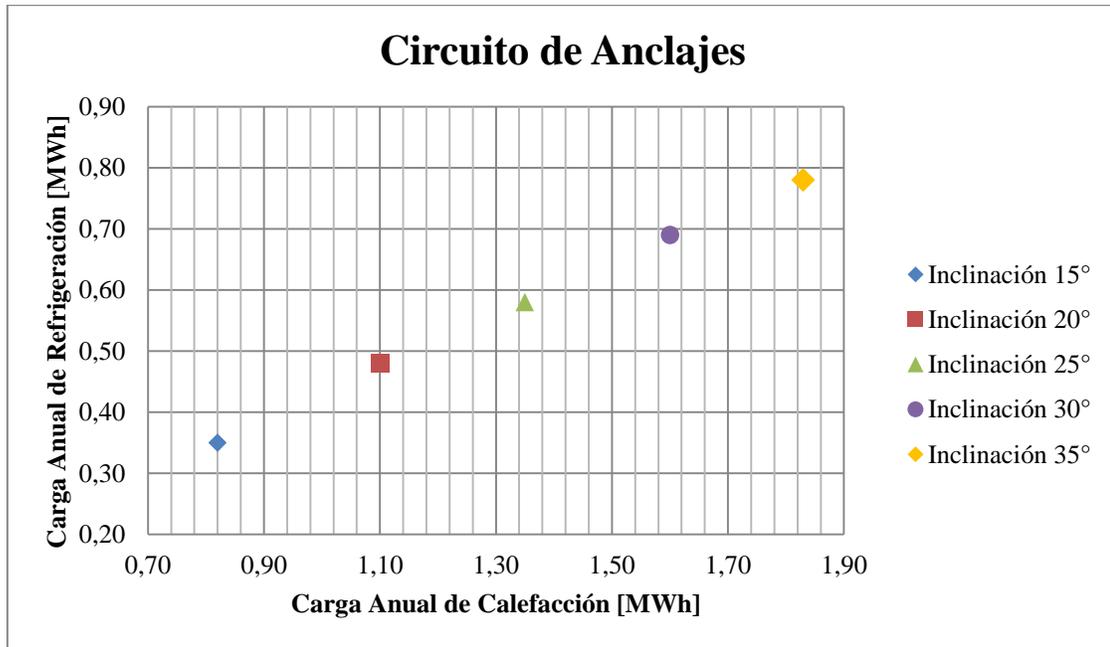


Figura 29: Carga anual tomada por circuitos de anclajes con distintas inclinaciones, modelos A1 al A5.

Se observa en primer lugar el aumento progresivo de la carga tomada, tanto de calefacción como de refrigeración, a medida que el ángulo de inclinación de los anclajes respecto de la horizontal aumenta. Para cada una de las inclinaciones se puede ver que la carga de calefacción es más del doble de la carga de refrigeración, hecho que ratifica lo observado en las modelaciones realizadas para las pilas. Cabe mencionar que la carga tomada por cada circuito de anclajes corresponde a la suma del aporte de cada una de sus tres líneas.

Como se mencionó anteriormente, los resultados expuestos en la Figura 29 ya tienen consideradas las condiciones de borde de los anclajes, que corresponden a los diferentes niveles de profundidad de cada anclaje y a la inclinación de estos.

El detalle de los valores obtenidos para las modelaciones de los anclajes con distinta inclinación se puede ver en el Anexo E.

#### 3.4.4 Pilas y anclajes con criterio de conservación ambiental

Las modelaciones realizadas anteriormente fueron llevadas a cabo considerando el criterio de maximización en base a aspectos técnicos, criterio que no toma en cuenta el impacto que esto pueda generar sobre las propiedades del suelo. Se realiza entonces una segunda serie de mediciones que sí consideran los aspectos ambientales que implica un aprovechamiento geotérmico, principalmente la posible saturación del suelo.

Las modelaciones realizadas en este caso son en base al criterio de conservación ambiental, expuesto en la sección 3.3.2 del presente capítulo, el cual toma en cuenta las recomendaciones que entrega la norma VDI 4640 (2001) con respecto a las temperaturas máximas y mínimas de circulación del fluido en función de la temperatura del suelo sin perturbar.

- Pilas

Para el caso de las pilas, se realizan modelaciones similares a las mostradas en el diagrama de la Figura 22 (modelos 1 al 12), que corresponde a la configuración de pila única, ya que con los modelos 13 al 36 se pudo concluir que el comportamiento de otro tipo de configuraciones viene dado por una ponderación de la pila única cuando la separación es de al menos 3 [m] entre pilas. La única diferencia recae en el criterio de modelación utilizado, imponiendo en este caso que la temperatura mínima de circulación del fluido fuera de 5°C mientras que la temperatura máxima de circulación fuera de 27°C.

La Figura 30 grafica los resultados obtenidos a partir de estas modelaciones. Cabe mencionar que dichos resultados no consideran la ponderación debido a las condiciones de borde.

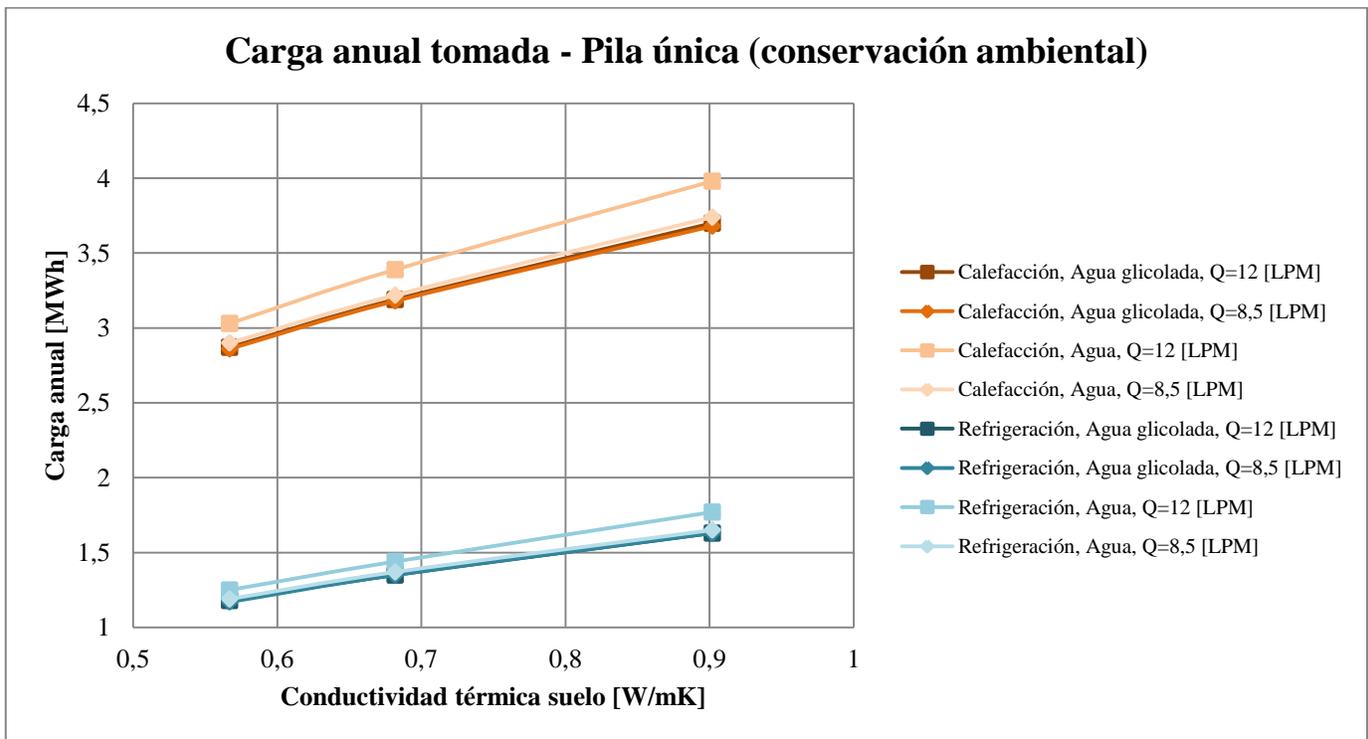


Figura 30: Carga anual tomada por una pila única con consideraciones ambientales, modelos 1Amb al 12Amb.

La principal diferencia que se tiene en comparación con las modelaciones de pila única realizadas con criterio de maximización (Figura 23) es el hecho de que, en este caso, la pila que es modelada con agua pura como fluido circulante toma más carga, tanto de calefacción como refrigeración, que la pila modelada con agua glicolada. Se sigue observando la relación lineal

existente entre carga tomada y conductividad térmica del suelo, además del hecho de que para el caso del agua glicolada como fluido circulante, no hay diferencia entre los distintos caudales utilizados. Por último, se puede ver que la pila modelada con agua como fluido circulante a un caudal de 12 [L/min] es la única que se diferencia de los otros modelos en cuanto a carga anual tomada por la pila.

El detalle de los valores obtenidos para las modelaciones de pila única con criterio de conservación ambiental se puede ver en el Anexo E.

- Anclajes

Para el caso de los circuitos de anclajes, se realiza una modelación con parámetros similares a los de la modelación A2 (inclinación de 20°) ya que es el modelo que representa la implementación de terreno, considerando esta vez el criterio de conservación ambiental.

En base a lo observado en la Figura 30, se concluye que para el caso del criterio de conservación ambiental, conviene utilizar agua pura como fluido circulante, único parámetro de entrada que diferencia esta modelación de la modelación A2.

La Tabla 6 muestra los resultados a partir de la modelación del circuito de anclajes aplicando el criterio de conservación ambiental. Cabe destacar que estos resultados sí consideran la condición de borde que presentan los anclajes.

Tabla 6: Resultados obtenidos a partir de la modelación A2 Amb.

Modelación	Ángulo Inclinación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Carga Anual [MWh]	
					Calefacción	Refrigeración
A2 Amb	20°	0,682	Agua	12	0,70	0,28

Se puede ver que la carga tomada por el circuito de anclajes aplicando criterio de conservación ambiental es menor que la carga tomada por el mismo circuito de anclajes aplicando criterio de maximización en base a aspectos técnicos.

### 3.5 Resultados de la modelación considerando condiciones de borde

El presente apartado tiene por objetivo obtener los resultados definitivos en cuanto a carga tomada por el sistema geotérmico implementado y así conocer el potencial del mismo. Para ello, es necesario aplicar las condiciones de borde que presenta el sistema. Además, se realiza otra serie de modelaciones una vez obtenidos los resultados finales para cada circuito, modelaciones que entregan el largo equivalente que tendría cada pozo (pilas y anclajes) si es que tuvieran geometrías y propiedades estándar de un pozo intercambiador de calor según normas internacionales (VDI 4640, 2001).

Ahora bien, como se determinó en la sección anterior para el caso de las pilas, la carga tomada por una línea de 10 pilas separadas a 3 [m] corresponde a la carga tomada por una pila

única multiplicada por 10, lo que indica que no hay mayor interferencia entre pozos para la geometría presente en terreno. Debido a esto se trabajará sólo con un valor de carga anual de calefacción y refrigeración para el caso de las pilas, que corresponde al valor obtenido a partir de la modelación 5Amb ya que es la modelación que mejor representa las condiciones presentes en terreno (pila única con valor de conductividad de suelo recomendada, agua pura como fluido circulante a un caudal de 12 [L/min], aplicando criterio de conservación ambiental). Para el caso de los anclajes, se utilizará el valor obtenido a partir de la modelación A2 Amb, que es la que mejor representa la implementación en terreno (inclinación de anclajes de 20°, conductividad del suelo recomendada, agua pura como fluido circulante a un caudal de 12 [L/min], aplicando criterio de conservación ambiental). Hay que destacar que los resultados obtenidos para los anclajes en la sección anterior ya tienen incorporadas las condiciones de borde que estos presentan.

### 3.5.1 Carga total tomada por los circuitos

Se conoce el potencial del sistema mediante el cálculo del aporte total que entregaría la implementación si hubieran sido implementadas todas las pilas y anclajes posibles. Para ello primero es necesario conocer el aporte definitivo de cada circuito en base a las modelaciones realizadas, las que tienen que representar de la mejor forma posible la situación presente en terreno.

- Circuito pila

Para el caso de las pilas implementadas, la modelación que representa de mejor forma la situación en terreno es la 5Amb, a la cual se le aplican las condiciones de borde para conocer su aporte definitivo.

La Tabla 7 muestra la carga anual tomada por esta pila aplicando las tres condiciones de borde expuestas en la sección 3.3.3 del presente trabajo.

Tabla 7: Carga tomada por la pila considerando las condiciones de borde.

Modelación	Carga Anual Total [MWh]		Condición de borde	[%] Aprovechable	Carga Anual Efectiva [MWh]	
	Calefacción	Refrigeración			Calefacción	Refrigeración
5Amb	3,39	1,44	Condición de borde 1	82,26	2,79	1,18
			Condición de borde 2	91,95	3,12	1,32
			Condición de borde 3	66,32	2,25	0,96

- Circuito anclajes

Para el caso del circuito de anclajes implementados, la modelación que representa de mejor forma la situación en terreno es la A2 Amb, cuyos resultados, que ya consideraban las condiciones de borde, fueron expuestos en la Tabla 6.

- Aporte total

Para conocer el aporte total del sistema implementado es necesario sumar la contribución de cada circuito de pilas y anclajes. Para ello hay que conocer la cantidad de pilas y anclajes que es posible de implementar y que condiciones de borde presentan.

La Tabla 8 muestra la cantidad de pilas y anclajes presentes en el sistema de entibación, separando para el caso de las pilas en las distintas condiciones de borde posibles de encontrar.

Tabla 8: Cantidad de pilas y anclajes presentes en el proyecto de entibación de Beauchef 851 (Pilotes Terratest S.A., 2009).

Estructura	Cantidad
Pilas con C.B. 1	90
Pilas con C.B. 2	6
Pilas con C.B. 3	1
Anclajes	97

Se puede conocer el aporte total de las pilas y los anclajes si el sistema completo de entibación estuviera implementado y qué porcentaje representa dicho aporte de la demanda térmica total del edificio Beauchef 851, lo que a su vez permite conocer el potencial de la implementación. La Tabla 9 muestra los resultados finales obtenidos.

Tabla 9: Aporte térmico total de la implementación.

	Carga Anual [MWh]	
	Calefacción	Refrigeración
Aporte Pilas	271,9	115,5
Aporte Anclajes	67,9	27,2
Aporte Total Implementación	339,8	142,7
Demanda térmica total Beauchef 851	584,1	901,5
<b>[%] Aportado por la implementación</b>	<b>58,2%</b>	<b>15,8%</b>

Se tiene entonces que el potencial del sistema geotérmico muestra que si se implementaran todas las pilas y anclajes posibles se podría tomar más de la mitad de la demanda térmica de calefacción y más de la décima parte de la demanda térmica de refrigeración del edificio.

### 3.5.2 Tasa de extracción/rechazo de calor

Otro de los parámetros que entrega el software EED como parte de las modelaciones corresponde a la tasa de extracción y de rechazo de calor, la que tiene unidades de [W/m]. Dichas tasas entregan una noción del rendimiento del sistema, por lo que es importante conocerlas, ya

que además son valores que se pueden comparar con las tasas obtenidas a partir de las mediciones realizadas en terreno.

- Pilas

Para el caso de las pilas, se consideran las tasas obtenidas a partir de las modelaciones de pila única aplicando criterio de conservación ambiental (modelos 1Amb al 12Amb), ya que como se mencionó anteriormente, la configuración presente en terreno hace que no haya interferencia entre pozos, por lo que el resultado de todas las pilas corresponde a la ponderación de la pila única por el total.

La Figura 31 muestra las tasas de extracción y rechazo de calor obtenidas a partir de las modelaciones mencionadas.

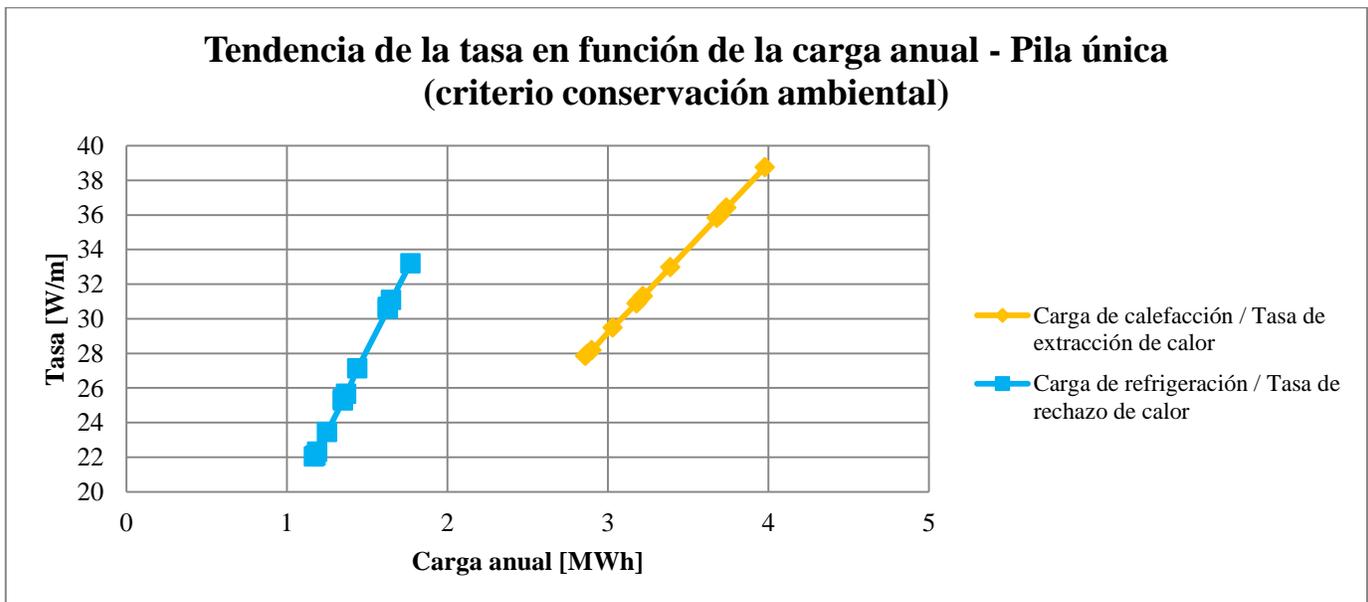


Figura 31: Tasa de extracción y rechazo en función de la carga anual tomada por la pila.

Se puede ver la relación lineal existente entre la carga anual y las respectivas tasas, teniendo una pendiente más pronunciada para el caso de la refrigeración / tasa de rechazo de calor. Ahora bien, para el caso de la modelación 5Amb, que como se mencionó es el modelo que representa de mejor forma la implementación presente en terreno, se tiene que la tasa de extracción de calor es de 32,99 [W/m] mientras que la tasa de rechazo es de 27,13 [W/m].

- Anclajes

Para el caso de los anclajes, se consideran los valores obtenidos a partir de la modelación A2 Amb, que es la que representa de mejor forma la situación presente en terreno. Se tiene entonces una tasa de extracción de calor de 12,3 [W/m] y una tasa de rechazo de calor de 10,7 [W/m].

### 3.5.3 Pozos equivalentes

Modelaciones realizadas para conocer la equivalencia, en cuanto a carga anual tomada, entre los circuitos implementados (Modelo Pila 5Amb y Modelo Anclaje A2 Amb) y un pozo estándar realizado para aprovechamiento geotérmico en base a recomendaciones de diseño de normas internacionales en cuanto a geometría y propiedades (VDI 4640, 2001).

Se tienen entonces dos modelos que entregan el largo equivalente para las pilas y anclajes implementados. La Figura 32 muestra un diagrama que resume las características de los modelos de pozos equivalentes realizados.

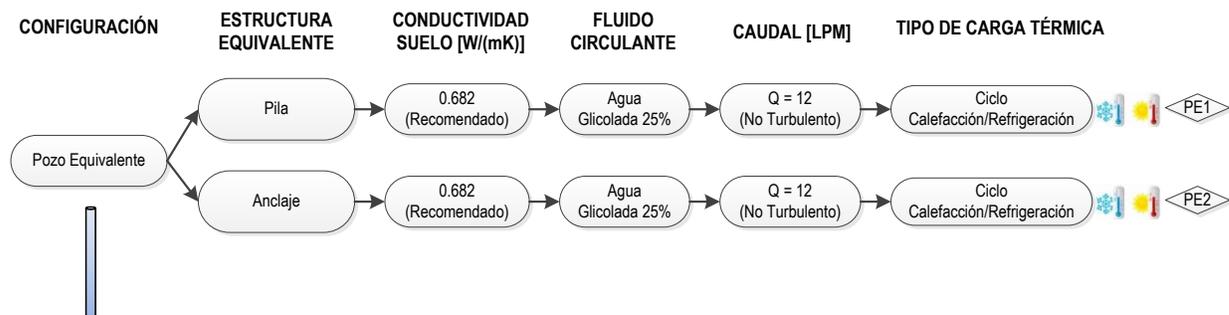


Figura 32: Diagrama de los modelos de pozos equivalentes realizados en EED.

- Pozo equivalente – Pila

Se realiza una modelación considerando propiedades y geometría de un pozo estándar para aprovechamiento geotérmico. A dicho pozo se le aplica la carga entregada por la modelación de pila única 5Amb considerando la condición de borde 1 y aplicando el criterio de conservación ambiental.

La Tabla 10 muestra las características de la modelación y el largo equivalente obtenido.

Tabla 10: Detalle del modelo realizado y largo equivalente obtenido para la pila.

Característica	Pozo Equivalente - Pila
Configuración circuito	Vertical Single U
Diámetro pozo	6" (152,4 [mm])
Diámetro tubería	3/4" (20 [mm])
Fluido circulante	Agua glicolada
Caudal	12 [L/min]
Material de relleno	Grout térmico Conductividad 1,47 [W/mK]
Carga de calefacción	2,79 [MWh] (C.B. 1)
Carga de refrigeración	1,18 [WMh] (C.B. 1)
Largo equivalente	52,0 [m]

- Pozo equivalente – Anclaje

Al igual que para el caso de la pila, se lleva a cabo una modelación considerando propiedades y geometría de un pozo estándar para aprovechamiento geotérmico. Se le aplica a dicho pozo la carga correspondiente a la modelación A2 Amb.

La Tabla 11 entrega el largo equivalente obtenido, además de las características de la modelación.

Tabla 11: Detalle del modelo realizado y el largo equivalente obtenido para el anclaje.

Característica	Pozo Equivalente - Anclaje
Configuración circuito	Vertical Single U
Diámetro pozo	6" (152,4 [mm])
Diámetro tubería	3/4" (20 [mm])
Fluido circulante	Agua glicolada
Caudal	12 [L/min]
Material de relleno	Grout térmico Conductividad 1,47 [W/mK]
Carga de calefacción	0,70 [MWh] (C.B. 1)
Carga de refrigeración	0,28 [WMh] (C.B. 1)
<b>Largo equivalente</b>	<b>16,6 [m]</b>

Se puede ver para el caso de la Pila que su largo equivalente (52,0 [m]) es mayor que el largo efectivo implementado en terreno (30 [m]), mientras que para el caso de los Anclajes sucede lo contrario ya que el largo equivalente (16,6 [m]) es menor que el largo efectivo implementado en terreno (41,5 [m]). Esto da indicios de la eficiencia térmica de cada uno de los circuitos implementados, siendo la Pila de entibación implementada más eficiente que un pozo estándar destinado a intercambio geotérmico. Lo opuesto ocurre para el caso del circuito de los Anclajes.

### 3.6 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se propone una estrategia de modelación que permite explorar el potencial del sistema geotérmico implementado, considerando por primera vez las condiciones de borde del sistema a través de métodos de ponderación y superposición. A través de la realización de 66 modelos en el software EED se puede conocer la influencia de distintos parámetros en la capacidad de tomar carga de los circuitos implementados. Se siguieron rigurosos estándares con el objetivo de que los resultados obtenidos a través de las modelaciones representen de la mejor forma posible la situación efectiva presente en terreno.

En primer lugar se obtiene el radio de influencia del bulbo de temperatura que se genera en torno al pozo (pila y anclajes) cuando estos son utilizados para generar transferencia de calor, lo que a su vez permite conocer el impacto que tienen las condiciones de borde particulares que

presenta cada circuito. En ese sentido cabe mencionar que de esta forma se está considerando por primera vez el efecto que tienen las condiciones de borde sobre el aporte térmico de la implementación, lo que a su vez genera que los resultados obtenidos se acerquen de mejor forma a la situación real en terreno.

Se puede observar, gracias a la modelación Pila Patrón, el efecto positivo que genera el ciclo calefacción/refrigeración en la capacidad de tomar carga tanto de las pilas como de los anclajes, lo que se debe a que el suelo durante el periodo de refrigeración recibe el calor excedente proveniente de una edificación, calor que se almacena en el suelo gracias a su inercia térmica y que es utilizado posteriormente en el ciclo de calefacción de dicha edificación mejorando su rendimiento térmico, hecho que es validado por estudios llevados a cabo por Wagner et al (2012).

Por otro lado, la modelación de Pila Patrón permite observar la relación entre la carga de calefacción y refrigeración tomada por una pila, relación que muestra que la carga de calefacción es prácticamente el doble de la carga de refrigeración, hecho que se condice con el flujo de calor geotérmico presente en el país, que es mayor que el promedio mundial (Muñoz and Hamza, 1993) y que hace que el suelo de Santiago sea más apropiado para calefaccionar que para refrigerar. Este hecho se reafirma con el resto de las modelaciones llevadas a cabo tanto para las pilas como para los anclajes, donde la relación sigue manteniéndose.

En relación a las 36 modelaciones llevadas a cabo para las pilas aplicando criterio de maximización en base a aspectos técnicos, se puede ver en primer lugar que no hay mayor interferencia entre pozos cuando la separación es de 3 [m], siendo la carga tomada por las configuraciones de líneas de 10 y 5 pilas ponderaciones por 10 y por 5 respectivamente de la carga tomada por una pila única. Otro hecho relevante de destacar lo genera el impacto que tiene el tipo de régimen de circulación del fluido al interior de las tuberías sobre la capacidad de tomar carga por parte de la pila, ya que se puede ver a partir de los gráficos que para el caso del agua pura la diferencia entre caudales genera una diferencia considerable en la carga tomada por la pila, no así para el caso del agua glicolada, donde la diferencia de caudales no genera diferencia entre la carga tomada, lo que se debe a que en el caso del agua pura como fluido circulante, el caudal de 12 [LPM] genera régimen turbulento y el caudal de 8,5 [LPM] genera régimen no turbulento, mientras que en el caso del agua glicolada como fluido circulante, ambos caudales generan régimen no turbulento. Por último, se puede ver que el mayor impacto en la carga tomada, tanto de calefacción como de refrigeración, lo genera la conductividad térmica del suelo en el que se encuentran los pozos, lo que concuerda con lo esperado en base a la literatura (Sanner et al., 2005).

Con respecto a las modelaciones realizadas para los anclajes considerando el criterio de maximización en base a aspectos técnicos se observa el aumento lineal que se genera en la carga tomada en función del ángulo de inclinación del anclaje. Dicho aumento se debe exclusivamente a la metodología adoptada para considerar las condiciones de borde de dicho circuito, ya que al aumentar el ángulo es menor la carga que se pierde debido a esa inclinación y a las distintas profundidades de cada línea de anclajes. Cabe mencionar que el software EED no permite

realizar modelaciones considerando pozos inclinados, razón por la cual es necesario proyectarlos en la vertical para poder modelarlos (Sanner, 2010).

En cuanto a las modelaciones realizadas aplicando criterio de conservación ambiental, se tiene que los resultados obtenidos a partir de estas son los considerados a la hora de calcular el potencial de la implementación, ya que la preservación del medio ambiente es uno de los principales objetivos que tiene el desarrollar este tipo de tecnologías, por lo que no tiene sentido llevar a cabo un aprovechamiento geotérmico que sature el suelo en el corto plazo. Se tiene entonces para el caso de las Pilas que la modelación 5Amb es la que representa de mejor forma las condiciones presentes en terreno mientras que para los Anclajes es la modelación A2 Amb. Cabe mencionar que en ambas modelaciones el fluido circulante elegido es agua pura ya que en el centro de Santiago no es necesario utilizar agua glicolada debido al clima mediterráneo que presenta y que genera que las temperatura no sean lo suficientemente extremas como para congelar el fluido al interior de la implementación (debido al aislante que se le aplica a las tuberías y a la inercia térmica que presenta el hormigón alrededor de estas). Se tiene entonces que los valores de carga anual obtenidas por estas modelaciones, considerando además las condiciones de borde de las pilas y los anclajes, muestran que la implementación tiene el potencial de tomar el 58% de la demanda de calefacción y el 16% de la demanda de refrigeración del edificio Beauchef 851. Ahora bien, cabe mencionar que estos valores han sido obtenidos haciendo una serie de consideraciones, por lo que será necesario ajustarlos y validarlos a partir de las mediciones realizadas en terreno.

Las tasas de extracción y rechazo de calor obtenidas por parte de las modelaciones reafirman el hecho de que el suelo de Santiago tiene mejores características para la calefacción que para la refrigeración, siendo tanto para las pilas como para los anclajes, mayor la tasa de extracción que la de rechazo de calor. Además, el gráfico generado para las tasas de la pila única muestra la mayor pendiente de la tasa de rechazo de calor, lo que muestra que el suelo se satura más rápido de lo que se agota en términos de calor.

Por último, los largos equivalentes muestran que el calor tomado por una Pila de 30 [m] de profundidad equivale a un pozo estándar de mucha mayor profundidad (52 [m]), lo que tiene relación con la masividad de la pila (Brandl, 2006) y con la gran inercia térmica del hormigón, características que hacen que la pila tenga mejores condiciones para el intercambio de calor que un pozo estándar, a pesar de su condición de borde. Lo contrario sucede para el caso del circuito de Anclajes, donde el largo equivalente muestra que el circuito, de largo efectivo 41,5 [m], equivale a un pozo con características estándar de mucha menor profundidad (16,6 [m]), lo que se genera a pesar de que para el caso de los anclajes, estos se encuentran en contacto directo con el acero de los cables, los que tienen una conductividad térmica mucho mayor que la del hormigón por sí solo.

## **4. CAPÍTULO IV. MEDICIONES EXPERIMENTALES**

### **4.1 Introducción al capítulo**

El presente capítulo muestra las mediciones realizadas como parte del presente trabajo de investigación, así como los resultados obtenidos a partir de estas. Se realizan mediciones sin inyección de calor, también llamadas de suelo no perturbado, que permiten conocer de manera indirecta la temperatura que hay al interior de la implementación. Se realizan también mediciones con inyección de calor que permiten conocer la conductividad y resistencia térmica del sistema implementado mediante la aplicación de la ecuación de Ingersoll and Plass (1948). Se explica además en el presente capítulo el funcionamiento del equipo de medición TRT utilizado para llevar a cabo las mediciones.

### **4.2 Equipo TRT**

La aplicación de un TRT es la herramienta escogida en el presente trabajo para obtener las propiedades térmicas del suelo, principalmente debido a su amplia validación (Sanner et al., 2005) y a la aplicación directa que se puede realizar de la teoría de la fuente lineal de calor de Ingersoll and Plass (1948). En términos generales, el funcionamiento del equipo TRT se basa en una bomba que hace circular un fluido a través de un circuito de tuberías, donde se va midiendo cada cierto tiempo la temperatura de entrada y de salida del fluido a dicho circuito, para así conocer la diferencia de temperatura que se genera. Adicionalmente, el TRT posee calefactores que permiten aplicarle una cantidad de calor conocida al sistema.

#### **4.2.1 Descripción y funcionamiento**

El diseño del TRT utilizado en el presente trabajo se describe en Guggisberg (2012), el cual a su vez fue una mejora del TRT diseñado y descrito en Muñoz (2011).

Se presenta a continuación un resumen de los distintos componentes que presenta el TRT, así como una breve descripción de su funcionamiento. Más detalles se pueden encontrar en los trabajos anteriores (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012).

- Bomba hidráulica de 2 [hp]: genera la circulación del fluido transportador de calor a lo largo de los circuitos implementados.
- Filtro de carbón activado: permite que el fluido circule libre de partículas que pudiesen afectar tanto las tuberías como los distintos elementos presentes en el TRT.
- Manómetro: para medir la presión a la cual circula el fluido transportador de calor.
- Rotámetro: para conocer el caudal al que circula el fluido transportador de calor.
- Calefactor: aplican una carga térmica conocida (potencia) al fluido que circula a lo largo de los circuitos implementados. Hay tres calefactor, uno de 500 [W], otro de 750 [W] y

finalmente uno de 1500 [W], todos conectados en serie y con funcionamiento independiente el uno del otro.

- Sensores USB de temperatura: permiten medir la temperatura del fluido a la entrada y a la salida de los diferentes circuitos.

Cabe mencionar que el fluido escogido en este caso para transportar el calor desde el suelo hacia el TRT es agua potable.

#### 4.2.2 Calibración

Como se menciona en Guggisberg (2012), la bomba hidráulica de circulación le aporta calor al fluido, parámetro que es importante conocer para así considerarlo a la hora de realizar los cálculos para la obtención de la conductividad térmica.

En el Anexo F se muestra el procedimiento completo llevado a cabo para conocer el aporte calórico que le genera la bomba de circulación al fluido.

La Tabla 12 resume los valores finales obtenidos a partir de los ensayos realizados para conocer el aporte calórico de la bomba.

Tabla 12: Resultados obtenidos del cálculo del aporte calórico de la bomba hidráulica.

Parámetro	Medición			
	02-05-2013	08-05-2013	16-05-2013	17-05-2013
Potencia efectiva total bomba	1.450 [W]	1.529 [W]	1.365 [W]	1.378 [W]
Energía que aporta al fluido	385.051,7 [Ws]	425.240,1 [Ws]	401.984,8 [Ws]	400.629,2 [Ws]
Aporte calórico al fluido	221,3 [W]	236,2 [W]	223,3 [W]	222,6 [W]
% Respecto a la potencia efectiva	15,3%	15,5%	16,4%	16,2%

Se tiene entonces que un 16% de la potencia total de la bomba se encarga de calentar el fluido circulante

#### 4.2.3 Ubicación en terreno

Las limitaciones presentes en terreno hacen que la distancia entre el TRT y la entrada/salida de los circuitos sea de 5 [m] aproximadamente, lo que es muy superior a lo recomendado por normas internacionales (IGSHPA, 2011), en donde indican que la distancia máxima entre TRT y pozo no debe ser mayor a 1,5 [m].

La Figura 33 muestra una imagen de la situación presente en terreno, donde se puede ver la ubicación del TRT y la distancia existente la entrada/salida de los circuitos.



Figura 33: Ubicación del equipo TRT en terreno.

### 4.3 Mediciones con suelo no perturbado

En estas mediciones se almacena agua al interior de los circuitos de las pilas y anclajes durante 4 horas aproximadamente con el objetivo de que el fluido adquiriera la temperatura del sistema. Pasado ese periodo necesario para que el fluido alcance una temperatura de equilibrio con el sistema se procede a registrar la temperatura de salida del agua durante el tiempo que tome sacar el volumen total almacenado en cada circuito. Este procedimiento se realiza de manera de tener datos para distintas horas del día, lo que permite conocer si hay influencia de las condiciones ambientales sobre los circuitos. Cabe mencionar que el volumen de agua al interior del circuito de la pila es de 127 litros aproximadamente, mientras que en los anclajes es de 55 litros. Este valor es importante de conocer ya que define la cantidad de tiempo que demora en salir todo el volumen de fluido almacenado en los circuitos, dependiendo del caudal al que se haga circular este.

Las Figuras 34 y 35 muestran los resultados obtenidos para las mediciones realizadas en cada uno de los circuitos para dos días distintos. Se grafica también la variación de la temperatura ambiente, con el fin de saber si esta tiene influencia sobre los circuitos. Las Tablas 13 y 14 muestran la temperatura promedio de cada uno de los circuitos, así como la temperatura promedio ambiental.

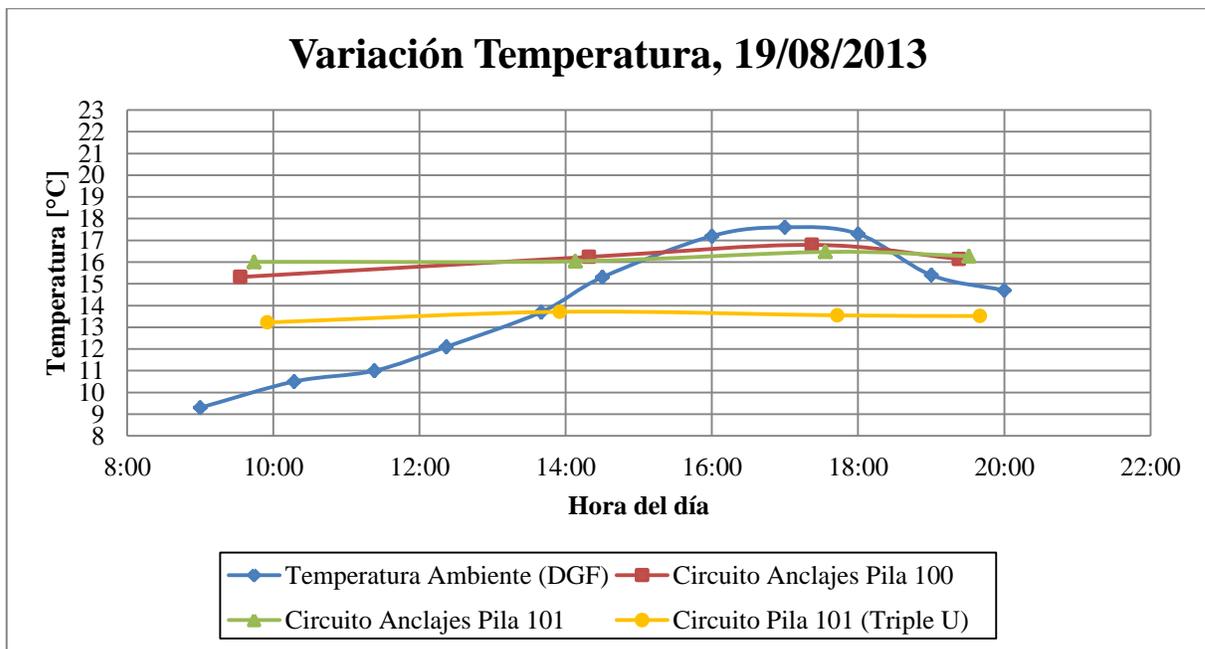


Figura 34: Variación de la temperatura durante el día en los circuitos (19/08/2013).

Tabla 13: Temperatura promedio de los circuitos (19/08/2013).

Circuito	Temperatura Promedio
Temperatura Ambiente	14,0 °C
Circuito Anclajes Pila 100	16,1 °C
Circuito Anclajes Pila 101	16,2 °C
Circuito Pila 101 (Triple U)	13,5 °C

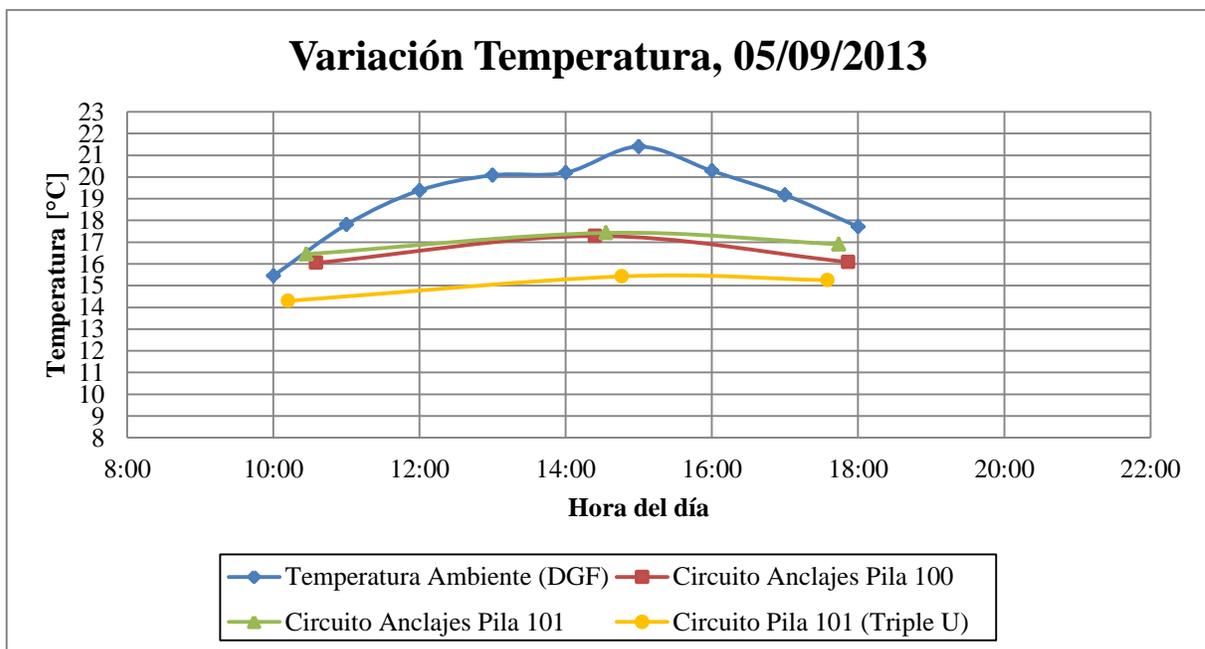


Figura 35: Variación de la temperatura durante el día en los circuitos (05/09/2013).

Tabla 14: Temperatura promedio de los circuitos (05/09/2013).

Circuito	Temperatura Promedio
Temperatura Ambiente	19,1 °C
Circuito Anclajes Pila 100	16,5 °C
Circuito Anclajes Pila 101	16,9 °C
Circuito Pila 101 (Triple U)	15,0 °C

Para la medición realizada el 19/08/2013 se puede ver que la variación durante el día de la temperatura ambiente tiene una influencia menor sobre la temperatura tanto de las pilas como de los anclajes, no habiendo mayor diferencia en la temperatura de cada circuito para las distintas horas consideradas (la mayor diferencia se observa en el circuito de anclajes de la pila 100, habiendo 1,5°C de diferencia entre la medición de las 9:33 horas y la de las 17:22 horas). Ahora bien, al comparar esos resultados con los obtenidos el 05/09/2013 se observa que la influencia de la variación de la temperatura ambiente sobre la temperatura de los circuitos sigue siendo menor durante el día (la mayor diferencia se puede ver nuevamente en el circuito de anclajes de la pila 100, habiendo 1,3°C de diferencia entre la medición de las 10:35 horas y la de las 14:24 horas), pero hay un notorio aumento en la temperatura promedio del circuito al interior de la pila, aumento que coincide con una mayor temperatura ambiente promedio durante ese día.

Se tiene entonces que la pila es la que se ve más afectada con la temperatura ambiente, lo que coincide con la exposición de estas tanto al patio inglés como a los subterráneos, motivo por el cual resulta importante analizar y entender el comportamiento térmico de dichos subterráneos (patio inglés presenta condiciones ambientales).

#### 4.3.1 Temperatura ambiente de los subterráneos

Ahora bien, también resulta importante analizar las condiciones térmicas de los subterráneos, ya que las pilas se encuentran en contacto directo con el muro perimetral que da hacia ellos, por lo que pueden influir en su comportamiento térmico, como se puede ver a partir de los resultados expuestos en las Tablas 13 y 14, habiendo un aumento de 1,5°C en la temperatura promedio del circuito de la pila 101 entre las distintas mediciones.

Se realizan mediciones de temperatura ambiente en cada uno de los subterráneos del edificio Beauchef 851, obteniéndose el perfil mostrado en la Figura 36. Cabe mencionar que la temperatura a los 0 [m] de profundidad corresponde a la temperatura ambiente (DGF).

La Figura 36 permite ver cómo los primeros subterráneos (-1 y -2) se ven notoriamente afectados por la temperatura ambiente, para luego tender a un valor similar en cada una de las mediciones, llegando a un valor de 15,6°C para la medición realizada el 19/08/2013 y a un valor de 15,1°C para la medición realizada el 05/09/2013.

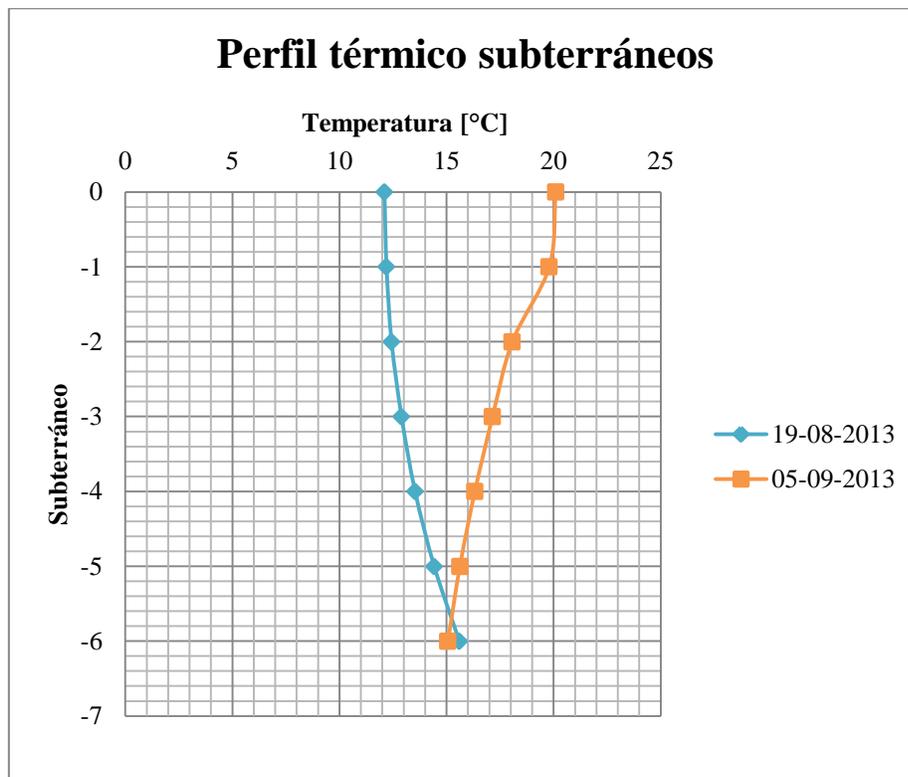


Figura 36: Perfil térmico de los subterráneos.

#### 4.4 Mediciones con inyección de calor

Estas mediciones se llevan a cabo con el objetivo de conocer los parámetros de conductividad y resistencia térmica de las pilas y anclajes implementados. En cuanto a esta medición, hay dos aspectos que son fundamentales y que definen la forma de llevar a cabo el ensayo. Primero, la duración del mismo, ya que mientras más horas dure el ensayo, más preciso es el resultado obtenido, siendo 40 horas una cantidad que asegura un error menor a un 5% en los resultados (Yavuzturk, 1999). Un segundo aspecto importante a resguardar es el impacto que tengan las condiciones ambientales sobre los datos registrados a partir de la aplicación de un test de respuesta térmica, ya que tanto el equipo TRT como las tuberías que quedan a la salida de los circuitos están expuestos a estas influencias externas, por lo que es importante que cuenten con una buena aislación térmica (Esen and Inalli, 2009).

Se realiza una primera serie de mediciones entre el 20 y el 26 de Agosto en el circuito de la pila 101 y en ambos circuitos de anclajes (el circuito de la pila 100 no pudo ser recuperado por lo que no se realizaron mediciones). Una segunda serie de mediciones fue llevada a cabo entre el 31 de Agosto y el 4 de Septiembre en el circuito de la pila y anclajes de la pila 101. Desde la Figura 37 a la 41 se muestran los datos registrados durante los ensayos TRT llevados a cabo como parte del presente trabajo. Cabe destacar que en dichos gráficos se muestra la temperatura de entrada y de salida del fluido, así como la temperatura media de circulación que esto implica, además de la variación de la temperatura ambiental durante las horas de ensayo realizadas.

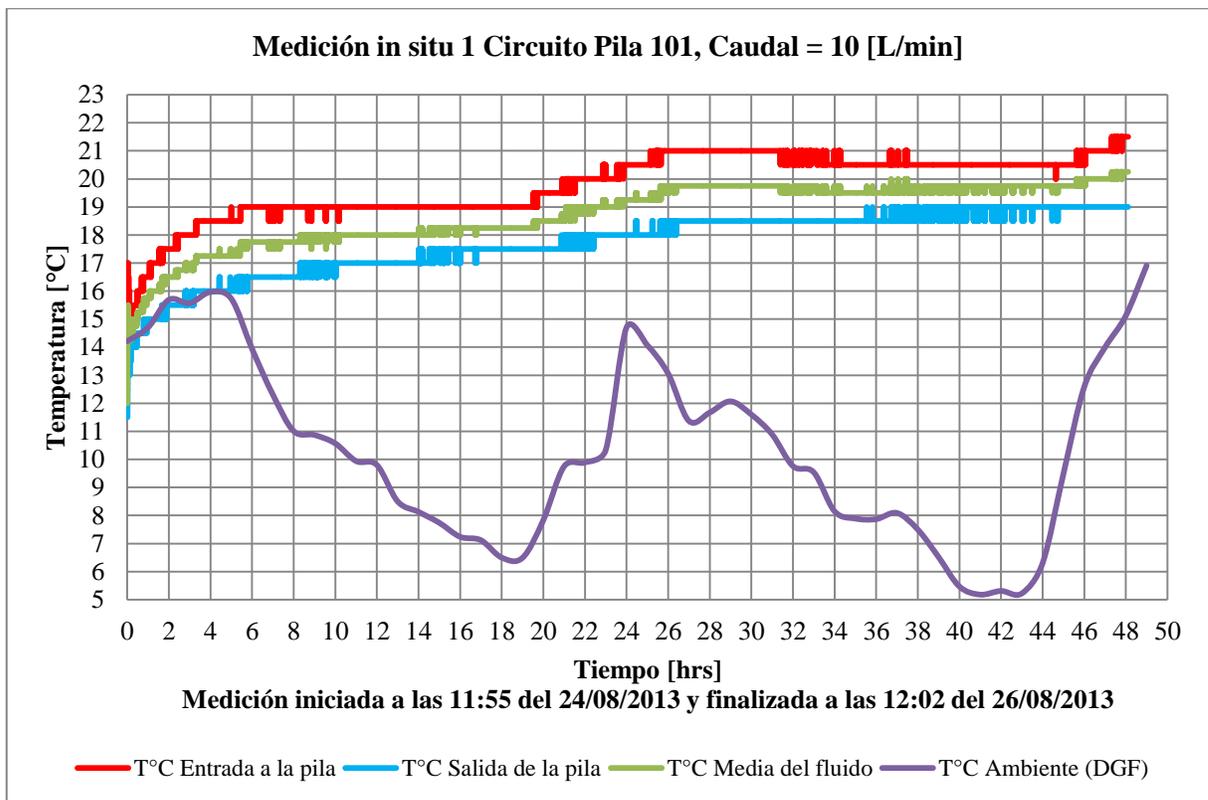


Figura 37: Medición in situ equipo TRT en Pila 101 entre el 24 y 26 de Agosto.

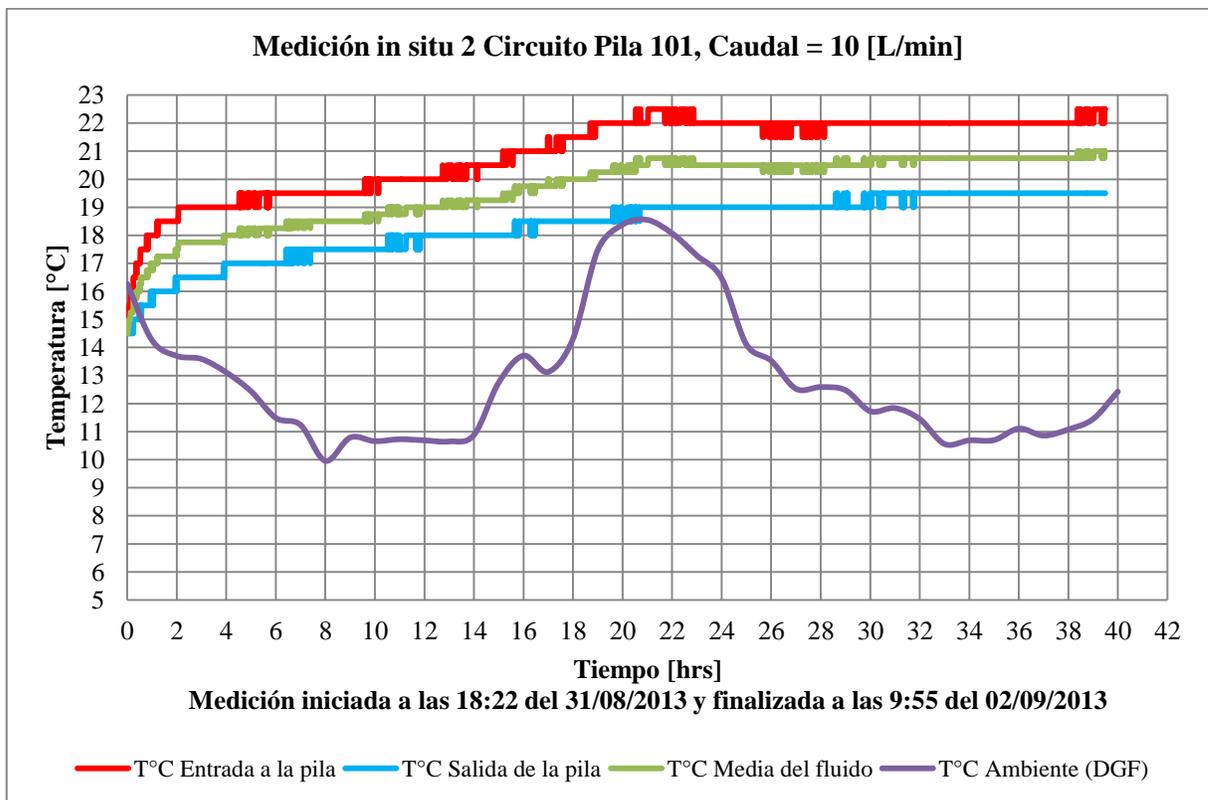


Figura 38: Medición in situ equipo TRT en Pila 101 entre el 31 de Agosto y el 02 de Septiembre.

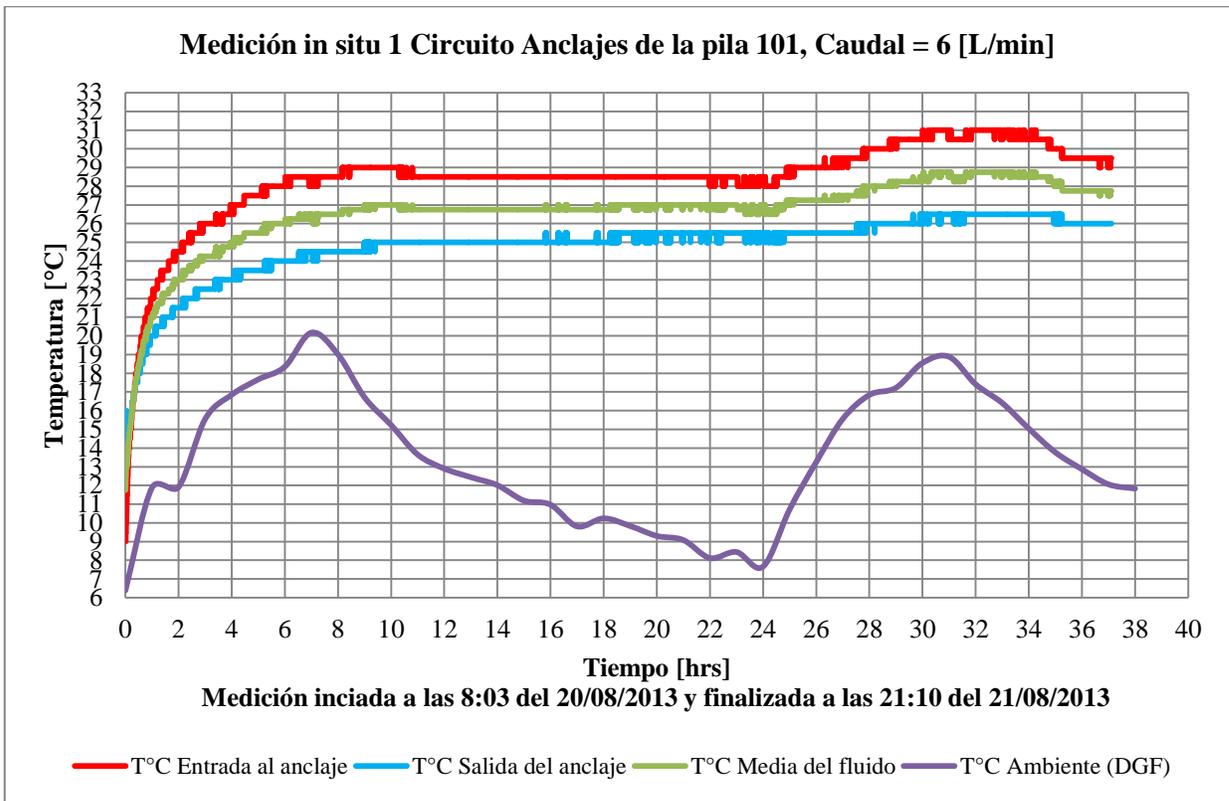


Figura 39: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 101 entre el 20 y 21 de Agosto.

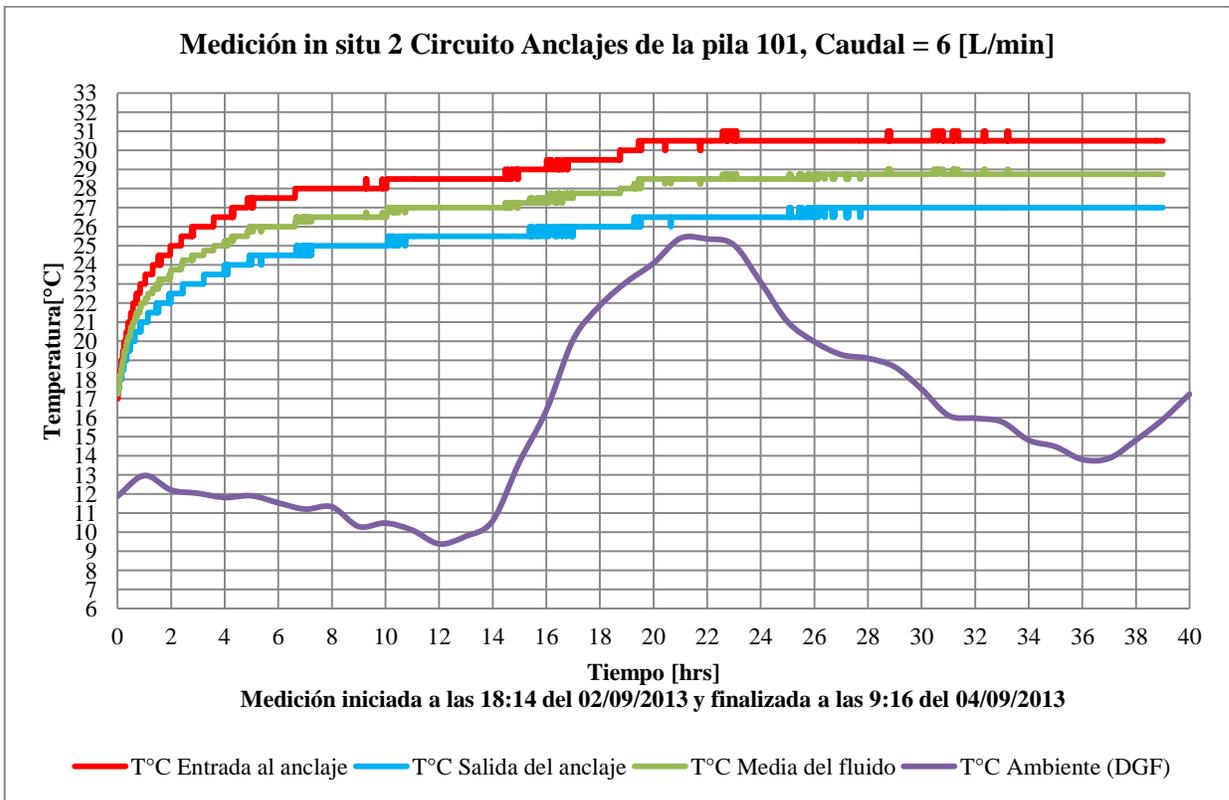


Figura 40: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 101 entre el 02 y 04 de Septiembre.

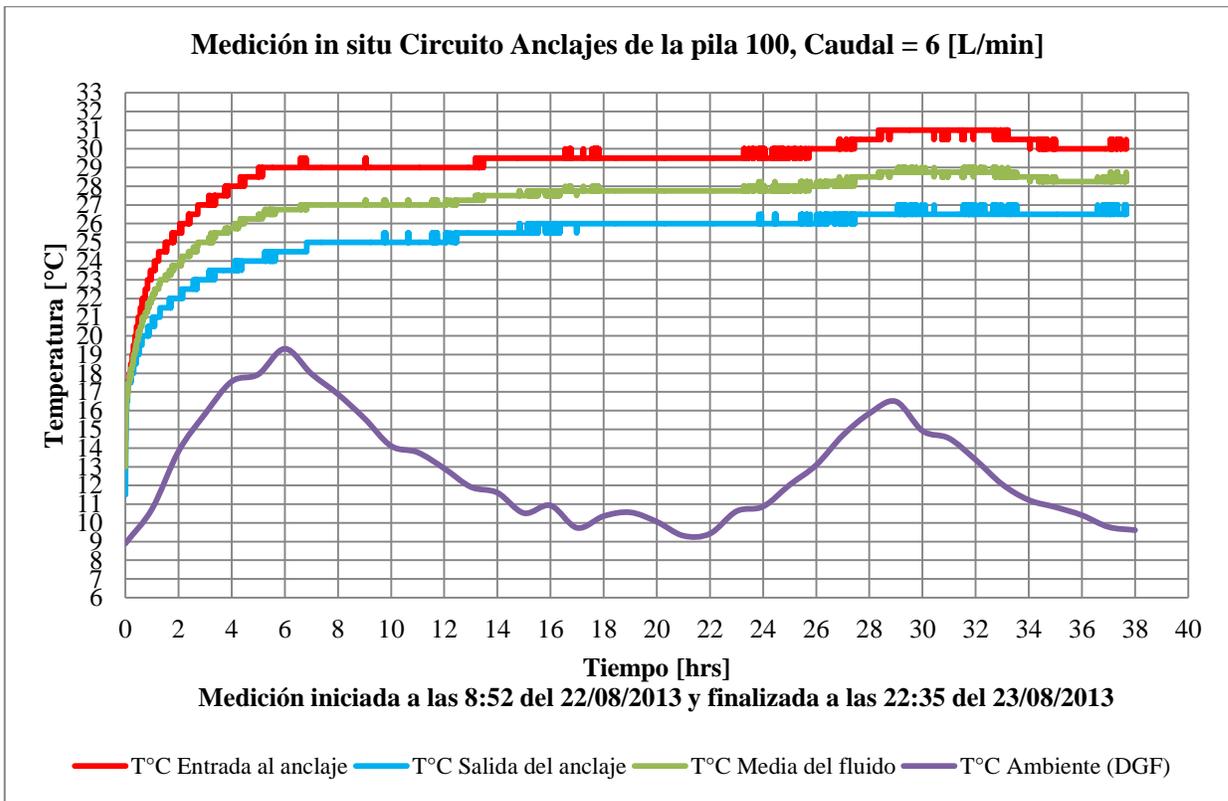


Figura 41: Medición in situ equipo TRT en Anclajes de pila 100 entre el 22 y 23 de Agosto.

En primer lugar, se puede ver en cada una de las mediciones realizadas para los diferentes circuitos el impacto que tiene la variación de las condiciones ambientales sobre la temperatura de circulación del fluido, habiendo un aumento en esta a la vez que hay un aumento de la temperatura ambiente.

Para el caso del circuito de la Pila 101 (Figuras 37 y 38) se observa que la temperatura de entrada máxima alcanzada por el fluido en estado estacionario es de 21°C en la primera medición y de 22°C en la segunda, mientras que la temperatura de salida del fluido se estabiliza en torno a los 19°C para la primera medición y 19,5°C para la segunda, generándose un delta de temperatura de 2,5°C aproximadamente entre la entrada y la salida del fluido en el circuito. Cabe destacar que el impacto de las condiciones ambientales es más notorio en el caso de la temperatura de entrada al circuito de la pila, viéndose un aumento mayor de esta temperatura en comparación a la temperatura de salida del fluido. Además, se puede ver un comportamiento parecido en cuanto a los tiempos en los que se alcanza el primer estado estacionario, el cual es relativo ya que se ve afectado por el aumento de la temperatura ambiente, indicando una falta de aislación térmica en el sistema, además del efecto que tiene el foso de luz al que da el muro perimetral que está en contacto con las pilas y que presenta condiciones ambientales. Por último, se tiene que las mediciones realizadas en la Pila 101 alcanzan las 40 horas de duración sin mayor inconveniente, teniendo incluso la primera medición una duración de 48 horas.

En cuanto al circuito de Anclajes de la pila 101 (Figuras 39 y 40) se observa nuevamente la influencia que tienen las condiciones ambientales sobre la temperatura de circulación del fluido, habiendo un aumento en dicha temperatura cada vez que aumenta la temperatura ambiente. Se vuelve a ver que este impacto de la temperatura ambiente es más notorio para la temperatura de entrada a la pila que para la de salida. En la primera medición el fluido alcanza una temperatura máxima de entrada al circuito de 29,5°C y una temperatura de salida del fluido de 26°C en estado estacionario, habiendo un delta de temperatura de 3,5°C entre entrada y salida. Para la segunda medición se puede ver un estado estacionario más claro, llegando el fluido a una temperatura de entrada de 30,5°C y a una temperatura de salida de 27°C, generándose nuevamente un delta de temperatura de 3,5°C entre entrada y salida.

Para la medición efectuada en el circuito de Anclajes de la pila 100 (Figura 41) se puede ver un comportamiento muy similar al de los Anclajes de la pila 101, habiendo nuevamente un efecto del aumento de la temperatura ambiente sobre la temperatura de circulación del fluido, siendo este aumento más notorio para el caso de la temperatura de entrada al circuito. El sistema llega a una temperatura de entrada del fluido de 30°C y a una temperatura de salida de 26,5°C en estado estacionario, siendo el delta de temperatura de 3,5°C.

Cabe mencionar que para ambos circuitos de Anclajes (Anclajes pila 100 y pila 101), las 40 horas de medición fueron más difíciles de alcanzar debido a que dichos circuitos presentaban pérdidas de agua mayores que el circuito de la Pila 101.

#### **4.5 Conclusiones del capítulo**

En el presente capítulo se muestran las mediciones llevadas a cabo mediante la aplicación de un test de respuesta térmica a los circuitos de pila y anclajes implementados en terreno, mediciones que posteriormente permiten conocer la conductividad y resistencia térmica de la implementación.

El primer hecho relevante de destacar es que en todas las mediciones con inyección de calor llevadas a cabo, tanto para el circuito de la pila como para los circuitos de los anclajes, se alcanzan condiciones de operación de un sistema geotérmico, ya que la temperatura máxima de circulación del fluido y la diferencia de temperatura entre el fluido que entra al circuito y el fluido que sale de este se acercan a valores recomendados por normas internacionales (VDI 4640, 2001). Esta norma indica que la máxima temperatura con la que el fluido portador de calor puede circular por el pozo intercambiador no puede ser de más de 11°C en comparación con la temperatura del suelo sin perturbar, mientras que la diferencia entre la temperatura de entrada y de salida del fluido dentro de un mismo circuito no puede exceder los 4°C.

Para el caso del circuito de la Pila se puede ver que la temperatura de entrada del fluido al circuito en estado estacionario es del orden de 6°C más que la temperatura del suelo sin perturbar, habiendo una diferencia aproximada de 2,5°C entre la temperatura del fluido que entra al circuito y el fluido que sale de este. Estos hechos muestran que si bien el sistema está

funcionando en condiciones de operación, no se está aprovechando todo su rendimiento, pudiéndose inyectar más calor para así acercarse aún más a los límites recomendados por norma. Se puede concluir entonces que la pila puede recibir una cantidad mayor de calor que la entregada en la presente tanda de mediciones.

Para el caso de los circuitos de los Anclajes se observa que estos alcanzan valores muy próximos a los recomendados por la norma, ya que la temperatura de entrada del fluido a los circuitos es en promedio 14°C mayor que la temperatura del suelo sin perturbar, generando un delta de temperatura de 3,5°C entre la temperatura de entrada y la de salida del fluido en cada circuito. Se tiene entonces que para el caso de los circuitos de los anclajes la cantidad de calor entregada es la que genera que el sistema trabaje a su máxima capacidad tomando en cuenta la recomendación de la norma VDI 4640 (2001).

En cuanto a la duración de las mediciones, se tiene que el objetivo era tomar datos por más de 40 horas para así disminuir el error en los cálculos obtenidos a partir de estos (Yavuzturk, 1999), lo que en general se pudo lograr para todas las mediciones. Cabe mencionar que para el caso de los circuitos de los Anclajes, dichas 40 horas de medición fueron difíciles de lograr debido a las pérdidas de agua que presentan las tuberías en un sector al que no se pudo tener acceso. Para el caso del circuito de la Pila, no hubo mayor problema en alcanzar las horas necesarias de medición, debido a que en dicho circuito las tuberías se reemplazaron completamente a partir de la cabeza de la pila, lo que genera que el sistema no presente mayores pérdidas ya que las tuberías al interior de la pila están protegidas por el hormigón.

Con respecto a las mediciones realizadas sin inyección de calor se observa que la variación de la temperatura ambiental tiene un efecto sobre el comportamiento térmico de los circuitos, siendo este efecto mucho menor que el apreciado en el trabajo llevado a cabo por Guggisberg (2012). Esto se debe principalmente a que el muro perimetral del edificio se encuentra en su cota 0,0 al momento de realizar las mediciones, lo que protege las pilas y los anclajes de las condiciones ambientales. Ahora bien, se observa el efecto que genera la condición térmica de patio inglés y los subterráneos sobre la temperatura al interior de la pila, lo que se debe al contacto directo de la pila con el muro perimetral que da hacia ellos (patio de luz presenta condiciones ambientales).

Otro aspecto importante de destacar es el efecto de las condiciones ambientales sobre las mediciones llevadas a cabo con inyección de calor, ya que para obtener buenos resultados a partir de dichas mediciones es crucial minimizar su efecto (Esen and Inalli, 2009). Este efecto se puede ver claramente reflejado en los gráficos de las Figuras 38 a la 41, generando un aumento en la temperatura de circulación del fluido cada vez que la temperatura ambiental asciende. Este hecho permite validar y ratificar las recomendaciones indicadas por la norma IGSH (2009), norma que recomienda aislar de buena forma las tuberías expuestas al medio ambiente y que la distancia máxima entre el equipo TRT y el circuito a ensayar sea de 1,22 [m]. Cabe destacar también la influencia que puede llegar a tener la fluctuación del calor inyectado al sistema, inyección que se realiza mediante calefactores eléctricos que se ven afectados por la variación de la potencia en la

red eléctrica. La norma IGSHP (2009) recomienda que el valor máximo de esta variación sea de un 10% como *peak*.

Por último hay que mencionar la inercia térmica que presenta el sistema implementado en cada uno de sus circuitos y que se puede observar a través de las mediciones realizadas, ya que el aumento en la temperatura ambiental tiene un efecto mayor en la temperatura de entrada del fluido que en la temperatura de salida de este, efecto que se puede ver en los tres circuitos ensayados y en cada una de las mediciones realizadas.

Se concluye entonces que, a pesar de las incertezas anteriormente mencionadas que están relacionadas con la aplicación de un test de respuesta térmica, las mediciones llevadas a cabo como parte del presente trabajo se pueden considerar exitosas, principalmente gracias a la duración de cada medición y que permite una corrección estadística de la fluctuación en el calor entregado y de la influencia climática, obteniéndose valores que se encuentran en los rangos de operación de cada circuito, pudiéndose incluso rechazar más calor para el caso del circuito de la Pila.

## **5. CAPÍTULO V. OBTENCIÓN DE RENDIMIENTOS Y PARÁMETROS TÉRMICOS**

### **EFFECTIVOS**

#### **5.1 Introducción al capítulo**

El presente capítulo muestra la obtención de los parámetros térmicos de la implementación geotérmica a partir de las modelaciones realizadas con el software EED y de las mediciones llevadas a cabo en terreno. En primer lugar se obtiene la conductividad y resistencia térmica de la implementación mediante la aplicación del modelo de fuente lineal de calor, modelo que además se detalla en el presente capítulo. Posteriormente se calcula la tasa de rechazo de calor por unidad de largo, la que entrega una noción del rendimiento del sistema.

#### **5.2 Conductividad y resistencia térmica**

La conductividad y resistencia térmica de la implementación son parámetros fundamentales de conocer ya que permiten orientar el diseño de sistemas geotérmicos (Javed et al., 2009). Para obtener dichos parámetros se aplica el modelo de la fuente lineal de calor y la ecuación de Ingersoll and Plass (1948).

El detalle de la aplicación de la ecuación de Ingersoll and Plass para la implementación estudiada en el presente trabajo se puede encontrar en el estudio realizado por Guggisberg (2012). Cabe mencionar que en este caso se utilizan dos largos distintos en cada circuito para realizar los cálculos, necesidad que nace del hecho de que las estructuras implementadas (pilas y anclajes) tienen condiciones particulares necesarias de tomar en cuenta. Para el caso de la pila se tiene su masividad debido a la relación diámetro/profundidad que presenta, además de no estar rodeada completamente de suelo. Para el caso de los anclajes, estos se encuentran inclinados y a distintas profundidades dentro del circuito. Se tiene entonces en primer lugar el largo efectivo que tienen las instalaciones en terreno, largo que para el caso de la pila es de 30 [m] (profundidad) y que para el caso de los anclajes es de 41,5 [m] (suma de los largos de cada rama de anclajes). En segundo lugar, se considera el largo equivalente obtenido a partir de las modelaciones realizadas en la sección 3.5.3 del presente trabajo. Dicho largo equivalente es de 52 [m] para el caso de la pila y de 16,6 [m] para los anclajes.

##### **5.2.1 Solución analítica ecuación Ingersoll and Plass (1948)**

En el presente trabajo, el modelo de la fuente lineal de calor es utilizado para determinar la conductividad térmica efectiva y la resistencia térmica de los pozos a partir tanto de los datos obtenidos experimentalmente como de los obtenidos a partir de las modelaciones.

Se utiliza el desarrollo de la ecuación de Ingersoll and Plass (1948) presentado en el trabajo de Signorelli et al. (2007). Se tiene entonces que la temperatura en la pared del pozo puede ser definida por:

$$T(r = r_b, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4\kappa t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + T_0, \quad \text{con } t_c \geq \frac{5r_b^2}{\kappa} \quad (1)$$

Dónde:  
 $r_b$  [m]: radio del pozo.  
 $t$  [s]: tiempo.  
 $q$  [W/m]: calor inyectado por unidad de largo de pozo.  
 $\lambda$  [W/mK]: conductividad térmica del sistema.  
 $\kappa$  [ $m^2/s$ ]: difusividad térmica.  
 $\gamma$  [0,5772...]: constante de Euler  
 $T_0$  [°C]: temperatura del suelo sin perturbar.  
 $t_c$  [s]: tiempo crítico.

El criterio del tiempo crítico se utiliza para que el máximo error de la fórmula (1) sea menos del 10%.

Ahora bien, introduciendo la resistencia térmica entre el fluido y la pared del pozo ( $R_b$ ), la temperatura media de circulación del fluido ( $\bar{T}$ ) como función del tiempo puede ser escrita cómo:

$$\bar{T} = T(r = r_b, t) + qR_b = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + q \left[ R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4\kappa}{r_b^2} \right) - \gamma \right) \right] + T_0 \quad (2)$$

$$R_b(t) = \frac{\bar{T}(t) - T_0}{q} \quad (3)$$

Dónde:  $R_b$  [mK/W]: resistencia térmica.

Si  $q$  es constante, los dos últimos términos de la ecuación (2) no cambian con el tiempo y dicha ecuación se transforma en una relación lineal:

$$\bar{T} = k \ln(t) + m \quad (4)$$

Se tiene entonces que graficando la temperatura media ( $\bar{T}$ ) versus el logaritmo natural del tiempo, la conductividad térmica puede ser obtenida como función de la pendiente  $k$  de dicha curva.

### 5.2.2 Conductividad térmica experimental

La conductividad térmica experimental se calcula en base al largo de los pozos (circuito pila de 30 [m] de profundidad y circuitos anclajes de 41,5 [m] de largo) presentes en terreno. El valor de conductividad térmica experimental puede ser comparado con el valor obtenido por Guggisberg (2012).

Cabe mencionar que el valor de difusividad térmica utilizado en cada caso corresponde al del medio que está en contacto directo con las tuberías, que para el caso del circuito de la pila es hormigón ( $\kappa_{hormigón} = 8,89 \times 10^{-7} [m^2/s]$ ) mientras que para el caso de los circuitos de anclajes corresponde a la mezcla entre lechada y cables de acero, que ponderando en base al modelo limitante en serie (Kandula, 2011) permite obtener el valor efectivo de la difusividad térmica de dicho medio ( $\kappa_{lechada+acero} = 1,03 \times 10^{-6} [m^2/s]$ ).

Para el cálculo del tiempo crítico se utiliza el radio del pozo equivalente ( $r_b = 7,62 [cm]$ ) ya que de esa forma se consigue un valor razonable para el tiempo a descartar en cada circuito. Se tiene entonces que para el caso de la pila el tiempo crítico a descartar para el cálculo de la conductividad térmica es de 9,07 [hrs], mientras que para el caso de los anclajes el tiempo crítico a descartar es de 7,83 [hrs], logrando de esta forma que los resultados tengan el menor error posible.

Desde la Figura 42 a la 46 se muestran los gráficos obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación (2) para la determinación de la conductividad térmica en base a los datos obtenidos mediante la aplicación de un TRT en cada circuito, mientras que desde la Tabla 15 a la 19 se muestra el resultado final alcanzado, así como los parámetros utilizados para obtenerlo.

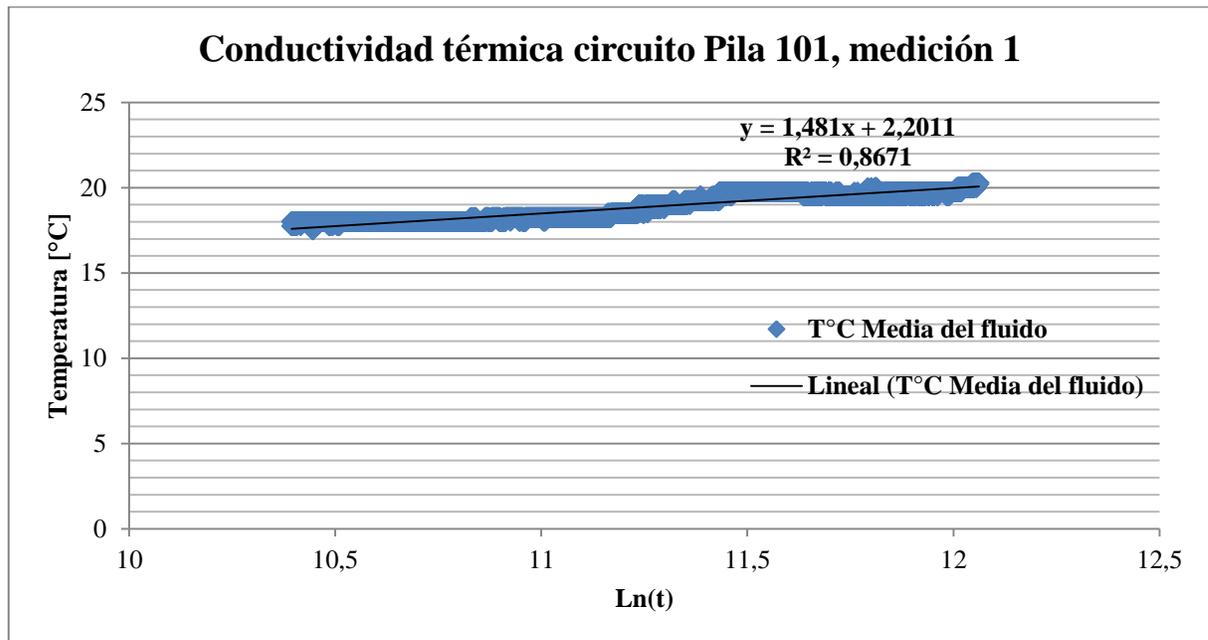


Figura 42: Pila 101 (Vertical Triple U), medición 1.

Tabla 15: Obtención conductividad térmica Pila 101 (Vertical Triple U), medición 1.

Pila 101 (Vertical Triple U) Medición 1	
Calor inyectado [W]	1270
Largo experimental [m]	30
k (Pendiente recta)	1,48
<b>Conductividad térmica experimental [W/mK]</b>	<b>2,27</b>

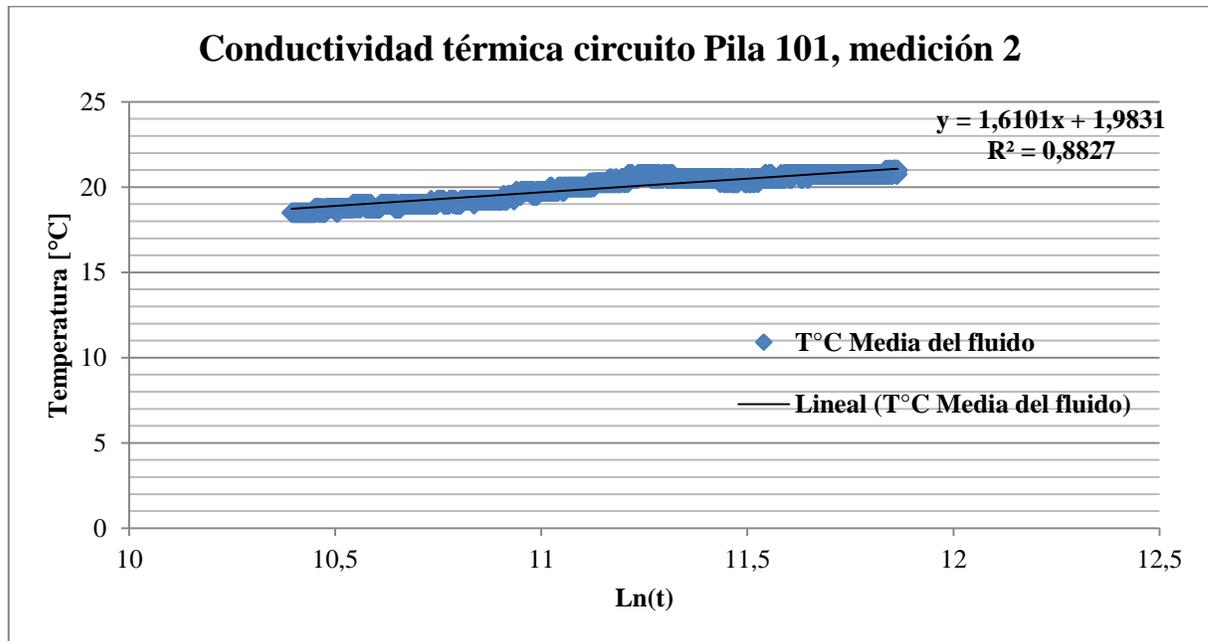


Figura 43: Pila 101 (Vertical Triple U), medición 2.

Tabla 16: Obtención conductividad térmica Pila 101 (Vertical Triple U), medición 2.

Pila 101 (Vertical Triple U) Medición 2	
Calor inyectado [W]	1274
Largo experimental [m]	30
k (Pendiente recta)	1,61
<b>Conductividad térmica experimental [W/mK]</b>	<b>2,10</b>

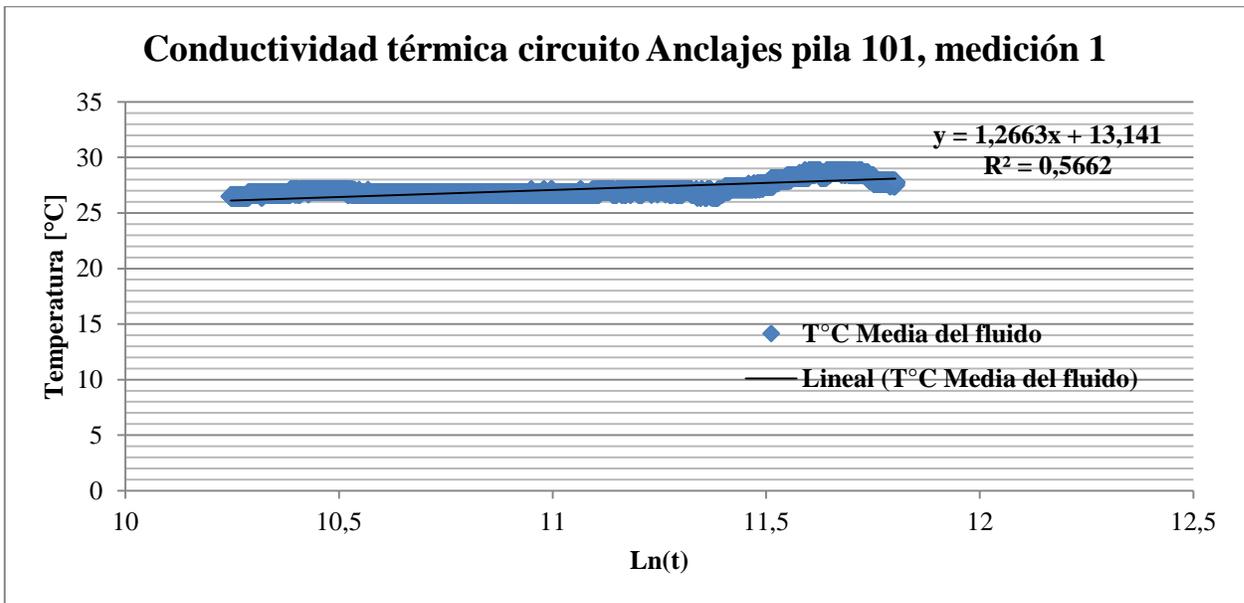


Figura 44: Anclajes pila 101, medición 1.

Tabla 17: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 1.

Circuito Anclajes pila 101 Medición 1	
Calor inyectado [W]	1234
Largo experimental [m]	41,5
k (Pendiente recta)	1,27
<b>Conductividad térmica experimental [W/mK]</b>	<b>1,89</b>

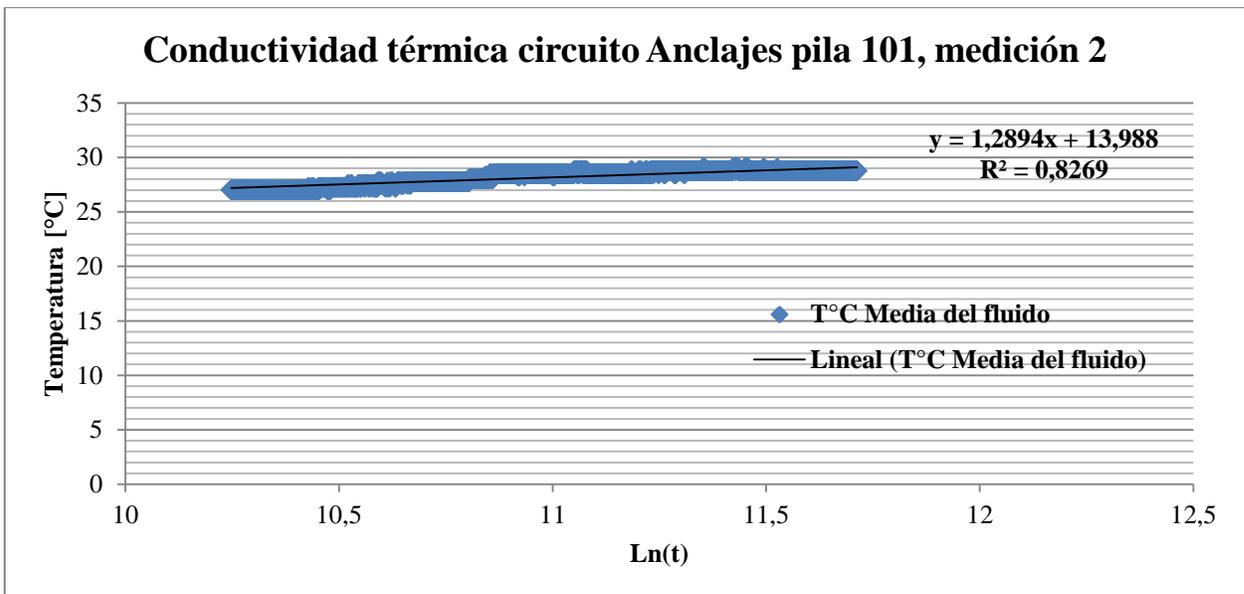


Figura 45: Anclajes pila 101, medición 2.

Tabla 18: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 2.

Circuito Anclaje pila 101 Medición 2	
Calor inyectado [W]	1215
Largo experimental [m]	41,5
k (Pendiente recta)	1,29
<b>Conductividad térmica experimental [W/mK]</b>	<b>1,83</b>

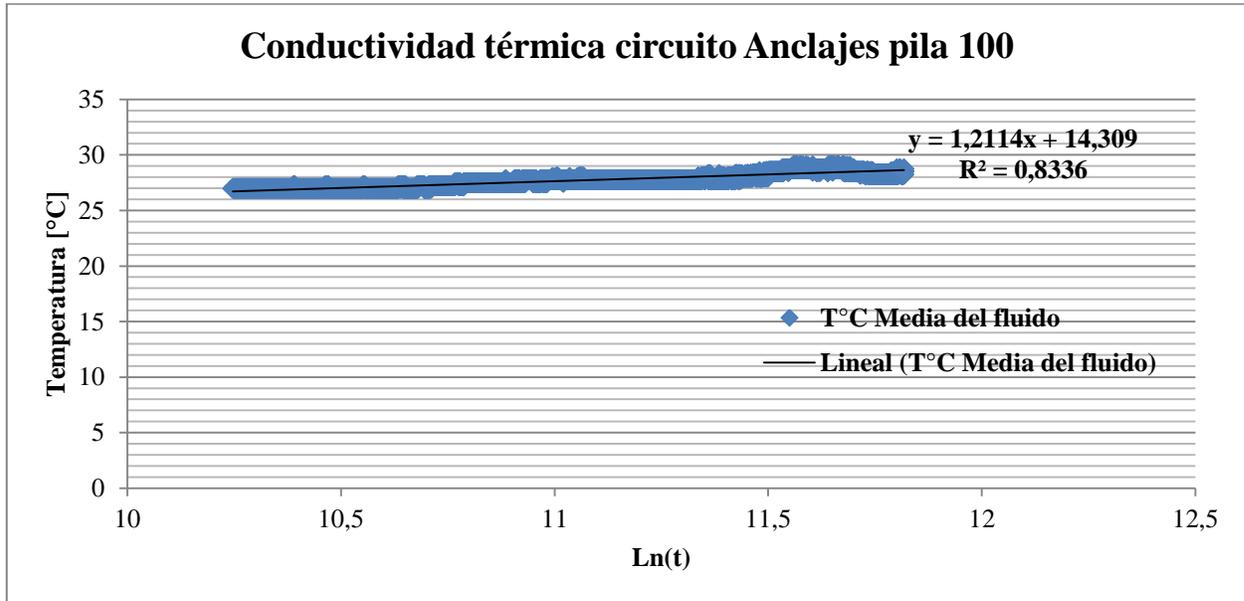


Figura 46: Anclajes pila 100.

Tabla 19: Obtención conductividad térmica Anclajes pila 100.

Circuito Anclaje pila 100	
Calor inyectado [W]	1237
Largo experimental [m]	41,5
k (Pendiente recta)	1,21
<b>Conductividad térmica experimental [W/mK]</b>	<b>1,98</b>

En relación a los resultados obtenidos para el circuito de la Pila 101 (Tablas 15 y 16) se observa en primer lugar que la diferencia de la conductividad experimental entre cada medición es de un 8,1%, lo que muestra la reproducibilidad del ensayo. En cuanto al valor se tiene que la conductividad térmica experimental del circuito de la Pila es de 2,19 [W/mK] promedio, valor que es mayor al del hormigón por sí solo (1,6 [W/mK]). Las Figuras 42 y 43 muestran que los datos graficados se acercan bastante a una recta, siendo en promedio  $R^2 = 0,88$ .

Para el caso de los resultados obtenidos para el circuito de Anclajes de la pila 101 (Tablas 17 y 18) se puede ver que la diferencia entre las conductividades térmicas experimentales en cada medición es de 3,3% lo que indica la reproducibilidad de los ensayos también para este caso. Con

respecto al valor, se tiene que la conductividad térmica experimental de este circuito es de 1,86 [W/mK] (promedio entre las dos mediciones), valor menor que el obtenido para el circuito de la Pila 101.

Para el circuito de Anclajes de la pila 100 se lleva a cabo sólo una medición debido a procesos constructivos que no permitieron llevar a cabo una segunda. En la Tabla 19 se observa que la conductividad térmica experimental de este circuito es de 1,98 [W/mK], valor levemente superior al obtenido para el circuito de Anclajes de la pila 101.

### 5.2.3 Resistencia térmica experimental

Para el caso de la resistencia térmica se sigue un procedimiento similar al de la conductividad térmica, utilizando la fórmula (3) para calcularla y considerando el largo experimental. Cabe mencionar que el valor de la resistencia térmica válido es el obtenido en el estado estacionario.

Desde la Figura 47 a la 51 se grafica el valor de la resistencia térmica experimental a lo largo del tiempo de medición, mostrándose además el valor en estado estacionario para cada caso.

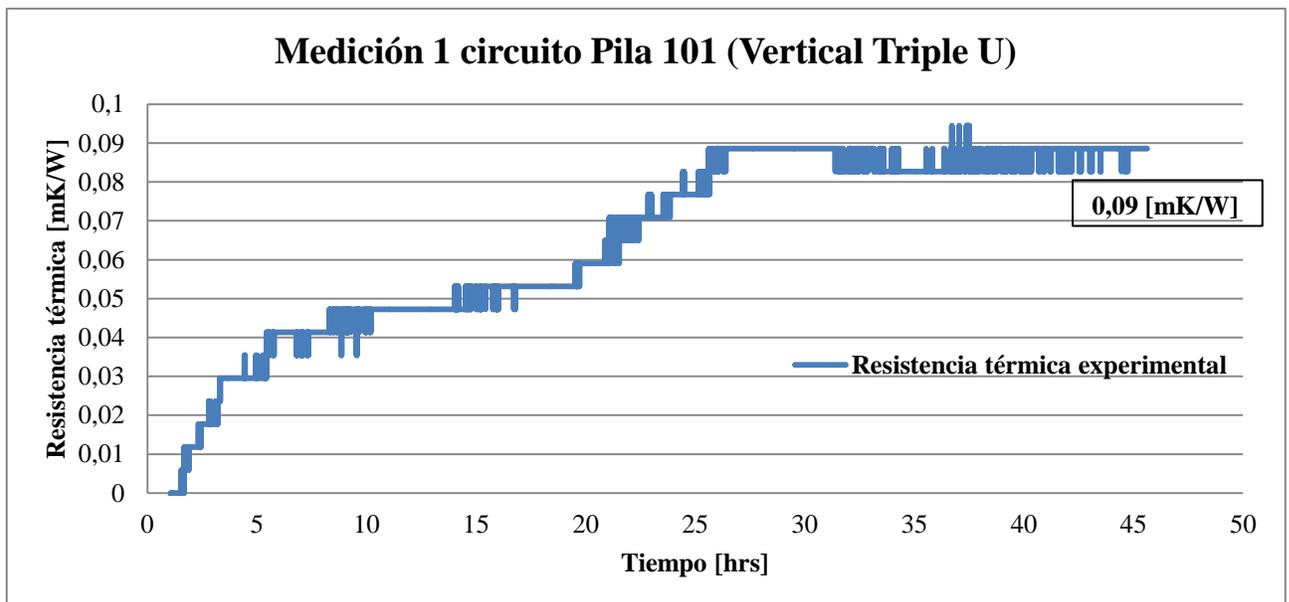


Figura 47: Cálculo de conductividad térmica Pila 101, medición 1.

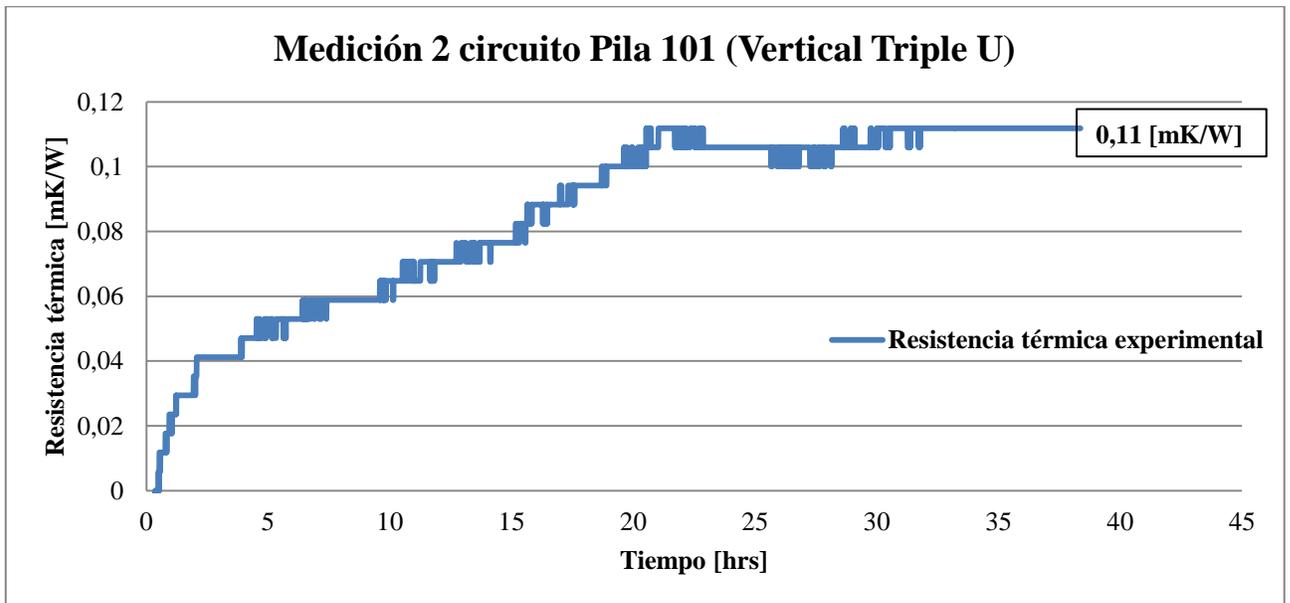


Figura 48: Cálculo conductividad térmica Pila 101, medición 2.

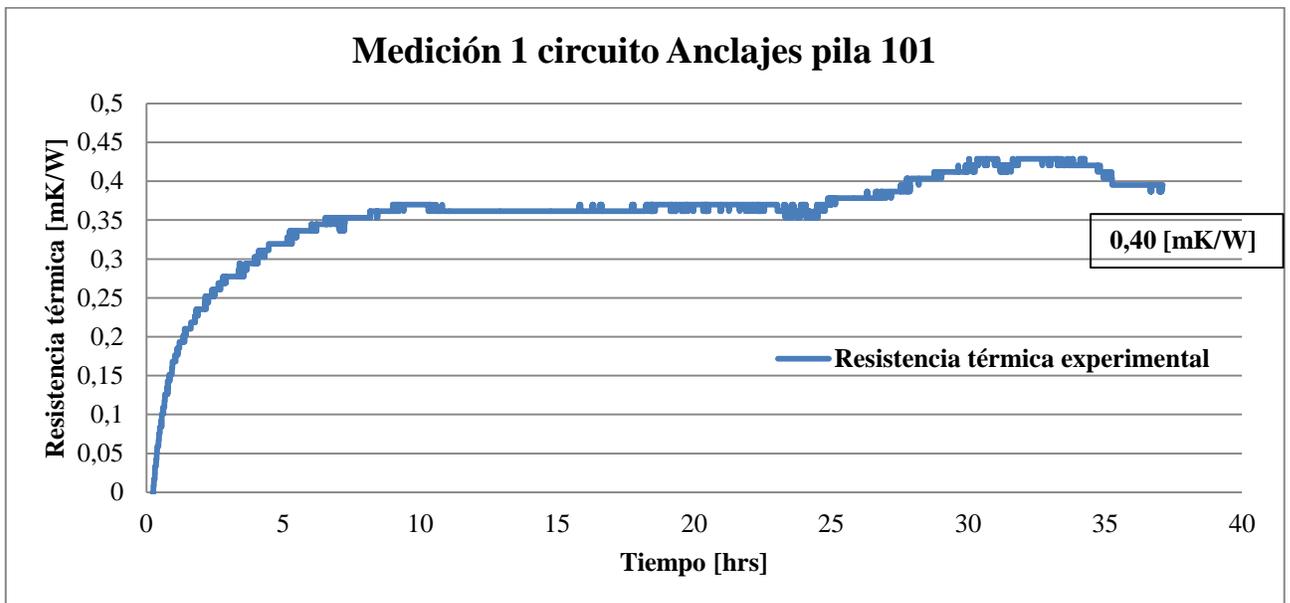


Figura 49: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 1.

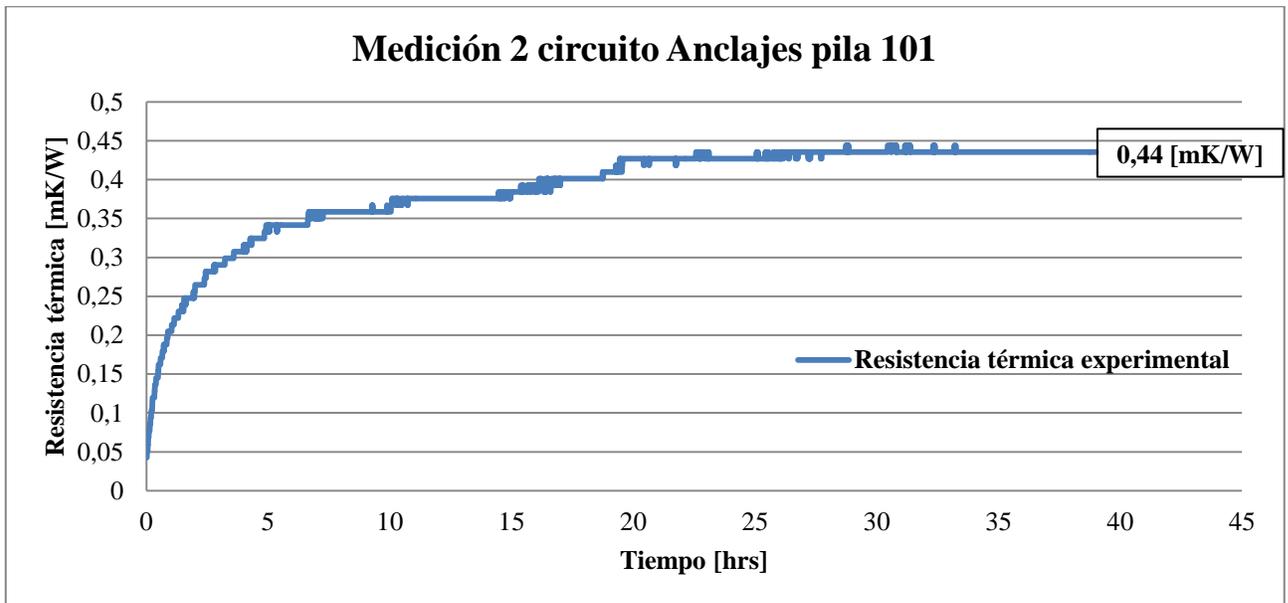


Figura 50: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 101, medición 2.

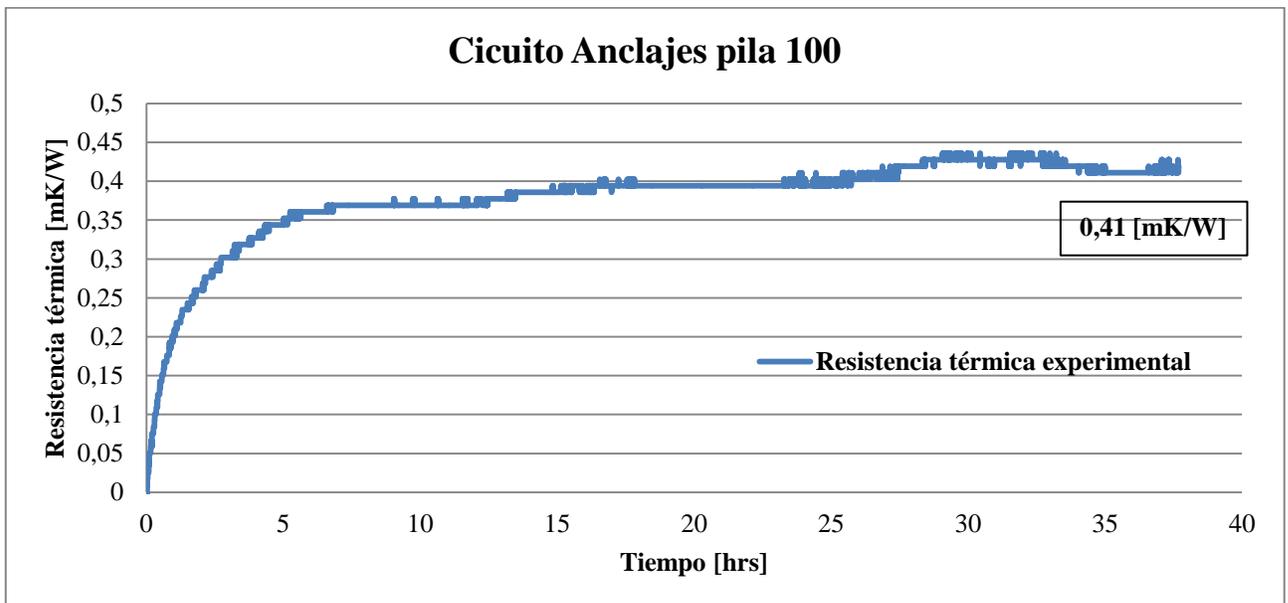


Figura 51: Cálculo conductividad térmica Anclajes pila 100.

Para el circuito de la Pila 101 se tiene una resistencia térmica experimental promedio de 0,10 [mK/W], mientras que para el circuito de Anclajes de dicha pila la resistencia térmica experimental promedio obtenida es de 0,42 [mK/W]. En relación al circuito de Anclajes de la pila 100, la resistencia térmica alcanzada es de 0,41 [mK/W], obteniéndose finalmente una resistencia térmica experimental promedio de 0,42 [mK/W] representativa de los circuitos de los Anclajes.

Los resultados de resistencia térmica experimental obtenidos son de suma importancia ya que permitirán ajustar los valores para el potencial de la implementación obtenidos mediante las modelaciones de la sección 3.5.1.

### 5.3 Rendimiento de la implementación

El rendimiento de la implementación se puede obtener mediante la tasa de rechazo o de extracción de calor en función de la profundidad del pozo. En este caso el parámetro utilizado será la tasa de rechazo de calor, ya que en las mediciones realizadas en terreno se le entregó calor al sistema mediante los calefactores que posee el equipo TRT.

La tasa de rechazo de calor se obtiene al dividir el calor inyectado al sistema por el largo del pozo intercambiador. La VDI 4640 (2001) entrega valores recomendados para la tasa de extracción de calor (símil de la tasa de rechazo) en función de la conductividad térmica del suelo en el que se encuentra la implementación. La Tabla 20 muestra dichos valores.

Tabla 20: Valores referenciales de tasa de extracción en base a la conductividad del suelo (VDI 4640, 2001).

Conductividad Subsuelo ( $\lambda$ )	Tasa de extracción
Pobre (sedimento seco) $\lambda < 1,5$ [W/mK]	20 - 25 [W/m]
Normal (subsuelo rocoso y sedimento saturado) $1,5 < \lambda < 3$ [W/mK]	50 - 60 [W/m]
Roca consolidada con alta conductividad térmica $\lambda > 3$ [W/mK]	70 - 84 [W/m]

En el caso de la implementación en estudio, el subsuelo por sí sólo cae en la categoría de pobre debido a su estratigrafía (grava seca), mientras que la conductividad efectiva de los circuitos (obtenida en la sección 5.2.2) cae en la categoría de normal.

La Tabla 21 muestra los resultados de tasa de rechazo de calor obtenida para cada medición, valores que indican el rendimiento de los diferentes circuitos.

Tabla 21: Rendimiento en términos de tasa de rechazo de calor para cada circuito.

Circuito	Medición	Calor inyectado [W]	Largo [m]	Rendimiento [W/m]
Pila 101	1	1270	30	42,3
	2	1274	30	42,5
Anclajes pila 101	1	1234	41,5	29,7
	2	1215	41,5	29,3
Anclajes pila 100	1	1237	41,5	29,8

En primer lugar cabe destacar que los valores de calor inyectado mostrados en la Tabla 21 corresponden a un promedio, ya que este valor fluctúa a lo largo de las mediciones debido a la variación inherente de la potencia entregada por el suministro eléctrico.

Los resultados de la Tabla 21 muestran que para el caso del circuito de la Pila 101 el rendimiento experimental, en términos de tasa de rechazo, es de 42,4 [W/m] promedio, siendo menor que lo esperado en base a los valores de referencia entregados en la Tabla 20 en función de la conductividad efectiva de dicho circuito (sección 5.2.2).

Para el circuito de Anclajes de la pila 101 se tiene que el rendimiento experimental promedio es de 29,5 [W/m], valor que se aproxima a lo representado por los valores referenciales de la Tabla 20 en función de la conductividad térmica del circuito.

Para el caso del circuito de Anclajes de la pila 100 se observa un comportamiento similar al circuito de Anclajes de la pila 101, teniendo un rendimiento experimental de 29,8 [W/m].

#### **5.4 Conclusiones del capítulo**

Las principales conclusiones del presente capítulo se generan a partir de los valores de conductividad térmica, resistencia térmica y tasa de rechazo de calor (rendimiento) obtenidos para cada circuito en base a las mediciones realizadas en terreno.

Se tiene para el caso de la Pila un valor promedio de 2,19 [W/mK] para la conductividad térmica experimental efectiva, valor que supera la conductividad térmica del hormigón (1,6 [W/mK]), que es el principal material componente de la pila implementada, y a la conductividad térmica del suelo en el que se encuentra inmersa la implementación, que corresponde a estratos de grava y que tiene una conductividad promedio de 0,682 [W/mK]. Se observa entonces una mejor conductividad térmica efectiva del circuito en comparación al material de relleno del pozo y al suelo que lo rodea, lo que se puede deber a la masividad de la Pila (gran volumen de hormigón inmerso en el suelo) y que genera que esta tenga una mayor inercia térmica. En cuanto a la resistencia térmica del circuito de la Pila, esta alcanza un valor experimental efectivo de 0,1 [mK/W], valor que reafirma las buenas condiciones de la pila para intercambiar calor (Sharqawy et al., 2009). Para el caso del rendimiento térmico experimental efectivo del circuito de la pila se tiene que este alcanza los 42,4 [W/m] en términos de tasa de rechazo de calor, valor que es menor a lo esperado en base a la conductividad térmica obtenida y que se condice con lo observado durante las mediciones llevadas a cabo en dicho circuito, donde se concluyó que se le podía entregar más calor para así llegar a los límites de funcionamiento en condiciones de operación recomendados por norma internacional (VDI 4640, 2001).

En cuanto al circuito de Anclajes se tiene que estos presentan una conductividad térmica experimental efectiva de 1,92 [W/mK], mostrando un comportamiento muy similar para ambos circuitos. El valor obtenido es menor al de la conductividad térmica del material de relleno del pozo (ponderación entre lechada y acero) pero mayor que la conductividad térmica del suelo, permitiendo que estos circuitos, al igual que el circuito vertical Triple U de la pila, sean

aprovechables en términos geotérmicos (VDI 4640, 2001). Por otro lado, la resistencia térmica experimental efectiva obtenida entrega un valor promedio de 0,42 [mK/W] para los circuitos de Anclajes, cantidad que es levemente mayor a lo encontrado en la literatura (Florides and Kalogirou, 2008; Esen and Inalli, 2009; Sharqawy, 2009) lo que se puede deber a inclinación y al menor diámetro de tuberías que estos presentan, que generan una mayor resistencia a la circulación del fluido (caudal logrado para los anclajes es de 6 [LPM] versus 10 [LPM] para el circuito de la pila). Con respecto al rendimiento térmico experimental efectivo se tiene un valor promedio de 29,6 [W/m] para los circuitos de Anclajes, cantidad que genera que los circuitos trabajen en el límite de las condiciones de operación recomendada por la norma internacional VDI 4640 (2001).

Se puede concluir finalmente que a pesar de las limitaciones que presenta la aplicación del modelo de fuente lineal de calor para el caso en estudio, debido a los supuestos que este realiza y a las condiciones de borde que presentan los circuitos, además de los errores inherentes al proceso de medición llevado a cabo para obtener los datos necesarios, los resultados obtenidos entregan una buena representación del comportamiento térmico que tienen los circuitos implementados, alcanzándose valores cercanos a lo esperado y que muestran que ambos circuitos son aprovechables en términos energéticos. Además, se puede concluir sobre la reproducibilidad de las mediciones realizadas en terreno, ya que hay una variación pequeña respecto de una medición con otra en cuanto a resultados obtenidos. Por otro lado, se tiene que las curvas mostradas desde la Figura 42 a la 46 se aproximan a una recta como era de esperarse. Se tiene que el circuito de la Pila presenta un comportamiento más eficiente que los circuitos de los Anclajes, presentando una conductividad térmica mayor y una resistencia térmica menor, así como una tasa más alta de rechazo de calor. Esto viene a validar los resultados obtenidos mediante las modelaciones expuestas en el Capítulo III, que también indican un mejor comportamiento térmico para el circuito de la Pila que para el circuito de los Anclajes.

## **6. CAPÍTULO VI. AJUSTE Y VALIDACIÓN**

### **6.1 Introducción al capítulo**

El presente capítulo tiene por objetivo ajustar y validar las modelaciones realizadas a través de los parámetros obtenidos mediante las mediciones llevadas a cabo en terreno. Se realizan nuevas modelaciones, esta vez ingresando como parámetro de entrada la resistencia térmica experimental efectiva obtenida en terreno, lo que permite rectificar el potencial de la implementación calculado en el Capítulo III del presente trabajo.

### **6.2 Ajuste del potencial de la aplicación**

Gracias a las mediciones realizadas en terreno a través de la aplicación de un test de respuesta térmica, se pudo conocer la conductividad y resistencia térmica efectiva de cada uno de los circuitos implementados. Esto a su vez permite volver a hacer modelaciones para el circuito de la pila y para el circuito de los anclajes, esta vez utilizando como parámetro de entrada la resistencia térmica experimental efectiva.

#### **6.2.1 Ajuste de modelación de la Pila**

Para el caso de la pila, la modelación a ajustar es la 5Amb, la que como se mencionó anteriormente representa de mejor forma las características del circuito implementado en terreno.

Se realiza entonces una nueva modelación, teniendo el circuito las mismas características que las de la modelación 5Amb, pero ingresando esta vez la resistencia térmica experimental obtenida a partir del TRT como parámetro de entrada. Cabe mencionar que en las modelaciones mostradas en el Capítulo III del presente trabajo, el software EED calculaba la resistencia térmica del sistema de manera automática a través de sus características (materiales, dimensiones, flujo). Ahora bien, el software también permite ingresar una resistencia térmica obtenida mediante mediciones en terreno, proceso que se lleva a cabo en la presente sección.

A través de las dos mediciones realizadas para el circuito de la pila se puede obtener el valor de la resistencia térmica experimental del sistema, como se muestra en la sección 5.2.3 del presente trabajo. Dicha resistencia térmica experimental se ingresa como parámetro de entrada al software EED, dejando los otros parámetros con los mismos valores considerados para la modelación 5Amb de la pila, lo que permite obtener nuevos valores de carga anual tomada por el circuito, valores que a su vez se contrastan con los obtenidos en la modelación original. La Tabla 22 muestra los nuevos resultados de carga térmica anual obtenidos considerando la resistencia térmica experimental, así como la diferencia porcentual con los resultados originales a partir de la modelación 5Amb.

Tabla 22: Ajuste de la modelación realizada para la pila mediante la resistencia térmica obtenida por las mediciones.

Modelación 5Amb		Ajuste de Modelación 5Amb			Disminución porcentual de la carga debido al ajuste	
Carga Anual [MWh]		Resistencia térmica [mK/W]	Carga Anual [MWh]		Disminución porcentual de la carga debido al ajuste	
Calefacción	Refrigeración		Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
3,39	1,44	0,10	3,11	1,32	9,0%	9,1%

Se observa en la Tabla 22 una disminución de las cantidades de carga anual tomada por la Pila, tanto para calefacción como refrigeración, del orden de un 9% en ambos casos debido al ajuste a partir de la resistencia térmica experimental. Esto muestra que la modelación realizada en primera instancia (la 5Amb sin ajustar) representa de buena forma la situación presente en terreno, ya que hay un cambio porcentual pequeño entre los diferentes valores.

### 6.2.2 Ajuste de la modelación de los Anclajes

Al igual que para el circuito de la pila, para el circuito de los anclajes también se realiza un ajuste de la modelación efectuada mediante los parámetros obtenidos por las mediciones realizadas en terreno.

En este caso el valor que se ajusta es el obtenido por la modelación A2 Amb, que corresponde a la modelación más representativa de la situación presente en terreno. Se realiza entonces una nueva modelación con las mismas características de la modelación A2 Amb, pero esta vez ingresando el valor de la resistencia térmica experimental efectiva obtenida a través de las mediciones realizadas. La Tabla 23 muestra los nuevos resultados obtenidos para la carga anual tomada por el circuito, así como los resultados de la modelación A2 Amb, lo que permite ver el efecto que tiene el ajuste sobre los valores alcanzados.

Tabla 23: Ajuste de la modelación realizada para los anclajes mediante la resistencia térmica obtenida por las mediciones.

Modelación A2 Amb		Ajuste de Modelación A2 Amb			Disminución porcentual de la carga debido al ajuste	
Carga Anual [MWh]		Resistencia térmica [mK/W]	Carga Anual [MWh]		Disminución porcentual de la carga debido al ajuste	
Calefacción	Refrigeración		Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
0,70	0,28	0,42	0,53	0,20	32,1%	40,0%

A diferencia de lo observado para el caso de la Pila, la Tabla 23 muestra una diferencia porcentual considerable para el ajuste realizado en base a las mediciones experimentales, lo que muestra que las modelaciones llevadas a cabo no se acercan de manera adecuada a la realidad, debido probablemente a la consideración de las condiciones de borde de los Anclajes (inclinación y distinta profundidad).

### 6.3 Validación del potencial de la implementación

A través de los ajustes hechos a las modelaciones en la sección 6.2 a partir de los valores obtenidos mediante mediciones en terreno, se puede validar el potencial de la implementación en términos de cuanta carga es capaz de tomar. Se procede entonces a calcular nuevamente el aporte de cada circuito, considerando las condiciones de borde que presentan. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 24, donde se puede observar el aporte térmico ajustado tanto de las pilas como de los anclajes, así como el porcentaje que este representa de la demanda térmica total del edificio en estudio.

Tabla 24: Aporte total de la implementación considerando ajustes a partir de mediciones en terreno.

	Carga Anual [MWh]	
	Calefacción	Refrigeración
Aporte Pilas (ajuste)	248,62	106,24
Aporte Anclajes (ajuste)	51,41	19,40
Aporte Total Implementación	300,03	125,64
Demanda térmica total Beauchef 851	584,09	901,45
<b>[%] Aportado por la implementación</b>	<b>51%</b>	<b>14%</b>

La Tabla 24 muestra que el ajuste y validación realizado a los resultados de las modelaciones a partir de los parámetros obtenidos mediante mediciones experimentales hace que la carga anual tomada por la implementación, que representa el potencial de esta, baje de un 58% a un 51% (7% menos) para el caso de la calefacción y de un 16% a un 14% (2% menos) para el caso de la refrigeración.

### 6.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se detalla el ajuste y validación de las modelaciones a partir de los parámetros térmicos obtenidos en base a las mediciones realizadas en terreno. Esto permite obtener el potencial definitivo de la implementación que da cuenta de la carga que sería capaz de tomar este sistema si se implementaran todas las pilas, y los respectivos anclajes, del sistema de entibación del edificio Beauchef 851.

Para el caso del circuito de la Pila, se tiene que el ajuste realizado es menor, cambiando la cantidad de carga tomada en alrededor de un 9% tanto para calefacción como refrigeración, lo que permite concluir que las modelaciones llevadas a cabo para el circuito de la Pila representan de buena forma lo observado a través de las mediciones realizadas en terreno.

En cuanto a los circuitos de Anclajes sí se observa un cambio notorio en la carga tomada a partir del ajuste realizado, bajando en un 32% para el caso de la calefacción y en un 40% para la carga de refrigeración. Esto indica que las modelaciones no se aproximan de la mejor forma posible a lo observado en terreno, pudiéndose deber principalmente a la consideración realizada para representar las condiciones de borde de dicho circuito (inclinación y diferente profundidad).

En cuanto al potencial aporte térmico total de la implementación, se tiene que este es de un 51% de la carga de calefacción del edificio y de un 14% de la carga de refrigeración, valores que reafirman el hecho de que el suelo en el que se encuentra la implementación presenta mejores condiciones para entregar calor (calefaccionar) que para recibirlo (refrigerar).

## **7. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES FINALES**

### **7.1 Introducción al capítulo**

En el presente capítulo se exponen los principales aprendizajes y conclusiones derivadas a partir de la investigación expuesta. Se muestran los resultados obtenidos y las posibles discusiones que estos generan, además de la contribución al conocimiento y el valor práctico que implica el desarrollo del presente proyecto de memoria. Por último, se entregan recomendaciones para futuras investigaciones que surgen a partir del interés de profundizar y detallar temas que van más allá del alcance del presente trabajo.

### **7.2 Resultados**

Los resultados obtenidos por el presente trabajo se generan a partir de las modelaciones realizadas en el software EED y de las mediciones llevadas a cabo en terreno con la posterior aplicación de las ecuaciones del modelo de la fuente lineal de calor (Ingersoll and Plass, 1948). Además, el presente trabajo se hace cargo de las recomendaciones de estudios anteriores (Guggisberg, 2012), simulando las condiciones de operación del sistema durante las mediciones realizadas, haciendo que estas mediciones tengan la duración recomendada para minimizar los errores asociados al modelo aplicado.

En cuanto a las modelaciones realizadas se tiene en primer lugar que estas consideran las condiciones de borde particulares de la implementación. Para el caso de las Pilas se realiza una ponderación en base al bulbo de temperatura que se genera alrededor de estas al momento de utilizarse para intercambiar calor, lo que permite saber cuánto calor se está perdiendo debido al contacto con el muro perimetral que da hacia los subterráneos. Para el caso de los Anclajes se realiza una superposición y una proyección en base a las distintas profundidades de cada rama y a la inclinación que estas poseen.

Las modelaciones realizadas muestran que el suelo de Santiago es mejor para calefaccionar que para refrigerar, ya que tanto para la Pila como para los Anclajes la carga de calefacción tomada fue siempre mayor que la carga de refrigeración, siendo alrededor el doble una de la otra. Esto se debe principalmente al elevado flujo de calor geotérmico que presenta Chile por estar ubicado sobre una zona de contacto entre placas tectónicas. Ahora bien, esto además contrasta con el hecho de que los edificios de oficinas, como lo es Beauchef 851, presentan mayor demanda por refrigeración que por calefacción.

Otro resultado importante obtenido a partir de las modelaciones corresponde a la mayor eficacia que presentan las Pilas para transportar calor en comparación con los Anclajes, ya que la carga tomada por las pilas, tanto de calefacción como de refrigeración, es mucho mayor que la de los anclajes, siendo del orden de 4 veces mayor para cada tipo de carga (considerando las condiciones de borde de cada circuito). Además, se observa un fuerte impacto de la

conductividad térmica del suelo sobre el rendimiento del sistema, pudiendo tomar más carga a medida que el suelo tiene mayor conductividad térmica. Ahora bien, este parámetro no es posible de cambiar, lo que indica que el mejoramiento del sistema tiene que basarse en otros aspectos. En ese sentido, el hecho de que el fluido circule con régimen turbulento es un aspecto relevante y posible de controlar, ya que los resultados muestran que los circuitos toman más carga cuando se presenta ese régimen de circulación.

Se tiene entonces que las modelaciones permiten obtener el potencial de la implementación en términos del porcentaje de la demanda térmica que es capaz de tomar si se implementara el sistema de entibación completo. El resultado obtenido indica que el potencial preliminar de la implementación es que puede tomar el 58% de la demanda por calefacción y el 16% de la demanda por refrigeración. Cabe mencionar que este resultado se denomina como preliminar ya que es necesario ajustarlo mediante los resultados obtenidos a partir de las mediciones experimentales realizadas en terreno (TRT).

Otro resultado importante de destacar con respecto a las modelaciones es la obtención del largo equivalente para cada uno de los circuitos (Pila y Anclajes). Este valor representa el largo que debería tener un pozo intercambiador de calor estándar (estándar en el sentido de su configuración y características) para poder tomar la carga que toman tanto la pila como los anclajes. Se tiene entonces que el largo equivalente para el caso del circuito de la pila es un pozo de 52 [m] de profundidad, mientras que para el caso de los anclajes el pozo tendría una profundidad equivalente de 16,6 [m]. Esto reafirma las favorables condiciones que tiene la pila para intercambiar calor, ya que para tomar la misma carga térmica habría que excavar un pozo de 52 [m], versus los 30 [m] que efectivamente tiene.

En cuanto a las mediciones los resultados obtenidos indican que se alcanzan condiciones de operación para todos los circuitos, en especial para los Anclajes, ya que para el circuito de la Pila se observa que se le puede entregar más calor para así acercarse más a los límites de condición de operación recomendados por norma (VDI 4640, 2001). Ahora bien, otro aspecto importante es la duración de las mediciones, la que alcanza los valores recomendados (Yavuzturk, 1999) para minimizar los errores asociados a la medición (impacto de las condiciones ambientales y fluctuación de la potencia entregada). Estos errores asociados a la medición son abordados en la sección de discusión del presente capítulo. Cabe mencionar además que para los dos circuitos se logra hacer circular el fluido (agua) en régimen turbulento, lo que genera una mejor transferencia del calor.

Con respecto a la obtención de parámetros térmicos a partir de las mediciones realizadas, los resultados alcanzados mediante la aplicación de las ecuaciones de la fuente lineal de calor (Ingersoll and Plass, 1948) muestran que para el caso del circuito de la Pila, la conductividad térmica efectiva es 2,19 [W/mK], lo que expone el mejoramiento que se genera sobre la conductividad térmica del suelo gracias al hormigón con el que se rellena la pila y a la masividad que esta posee. Por otro lado, la resistencia térmica efectiva de la pila, valor importante ya que permite ajustar y validar las modelaciones, es 0,1 [mK/W] mientras que el rendimiento del circuito es 42,4 [W/m] en términos de tasa de rechazo de calor, valor que incluso puede ser

mejorado en base a lo observado en las mediciones. Por otro lado, para los Anclajes se tiene una conductividad térmica efectiva de 1,92 [W/mK], una resistencia térmica efectiva igual a 0,42 [mK/W] y un rendimiento térmico de 29,6 [W/m], valores que también indican, al igual que en las modelaciones, que la Pila tiene mejores condiciones para generar intercambio de calor que los Anclajes. Cabe mencionar que estos resultados se consideran válidos ya que han sido obtenidos a partir de mediciones con la duración recomendada y que logran condiciones de operación, además de la utilización de tiempo crítico a descartar para la aplicación del modelo de fuente lineal de calor.

Ahora bien, los parámetros térmicos obtenidos a partir de las mediciones permiten ajustar y validar las modelaciones realizadas y el potencial térmico asignado al sistema. Esto se logra mediante nuevas modelaciones que tienen como parámetro de entrada la resistencia térmica efectiva de cada circuito. Los resultados obtenidos a partir de dicho ajuste muestran que para el caso de las Pilas la modelación inicial realizada se acerca a los resultados obtenidos de las mediciones, habiendo un ajuste de un 9% de los valores de carga tomada por el sistema. Para el caso de los Anclajes el ajuste es mayor, llegando a un 32% de corrección para la carga de calefacción tomada y a un 40% de corrección para la carga de refrigeración. Se tiene entonces un nuevo potencial para la implementación que ha sido validado y que se denomina potencial efectivo del sistema, el que indica que la implementación completa sería capaz de tomar el 51% de la demanda de calefacción y el 14% de la demanda de refrigeración del edificio. Se puede ver que si bien el ajuste realizado sobre los anclajes es significativo, este no tiene un impacto tan notorio sobre el potencial de la implementación, esto debido a la poca carga que los Anclajes toman en comparación con la carga aportada por la Pila.

Se tiene entonces que el resultado final del presente trabajo es una estrategia de modelación validada mediante mediciones que permite conocer el potencial de una implementación geotérmica con condiciones de borde especiales y consideradas a través de ponderación, superposición y proyección.

### **7.3 Discusión**

Un punto interesante de discutir es la validez de los resultados obtenidos, ya que estos han sido alcanzados a través de la utilización de supuestos y la aplicación de mediciones que tienen errores inherentes asociados. En cuanto a las modelaciones, estas han sido realizadas haciendo ciertas consideraciones con respecto a las condiciones de borde, consideraciones que no necesariamente son las correctas y que cómo se pudo ver tuvieron que ser corregidas mediante mediciones. Con respecto a las mediciones, el test de respuesta térmica tiene errores asociados que es necesario minimizar, cómo el efecto de las condiciones ambientales externas, las fluctuaciones de la potencia entregada al sistema y la precisión de los instrumentos, errores que son minimizados gracias a la duración dada al ensayo y a las condiciones de operación alcanzadas. Por último, y respecto a los parámetros obtenidos, se tiene que la aplicación del modelo de la fuente lineal de calor (Ingersoll and Plass, 1948) implica hacer supuestos que en este caso no se cumplen, como el medio homogéneo e infinito, el pozo de largo semi infinito y la

transferencia radial de calor, lo que puede generar variabilidad en los resultados obtenidos, a pesar de descartar el tiempo crítico que genera que la ecuación tenga un error menor a un 10%.

Se tiene entonces que si bien hay una serie de errores y supuestos asociados estos han sido rigurosamente abordados y minimizados, por lo que se puede concluir que los resultados obtenidos son válidos, ya que además fueron ajustados y validados.

#### **7.4 Contribución al conocimiento**

La principal contribución al conocimiento del presente trabajo es la generación de una estrategia de modelación que permite abordar, entender y diseñar una implementación geotérmica integrada constructivamente y que presenta condiciones de borde únicas que fueron indicadas como una limitación teórica a partir de la revisión bibliográfica realizada. Esta estrategia de modelación abarca, por primera vez, las condiciones de borde de cada circuito a través de procesos de ponderación, superposición y proyección. Además, ha sido ajustada y validada a partir de mediciones en terreno.

En cuanto a las investigaciones anteriores desarrolladas en esta línea de trabajo (Muñoz, 2011; Guggisberg, 2012) la contribución al conocimiento por parte del presente trabajo es la obtención de parámetros térmicos (conductividad, resistencia y rendimiento) en condiciones de operación del edificio, aplicando además las restricciones necesarias para que estos resultados se consideren válidos.

Con respecto al modelo de la fuente lineal de calor (Ingersoll and Plass, 1948) el presente trabajo contribuye en mostrar su aplicación en implementaciones que no cumplen con todos los supuestos necesarios pero en las que se han aplicado todas las restricciones necesarias para que los resultados se ajusten a la realidad.

#### **7.5 Valor práctico**

En el diseño de pozos intercambiadores de calor muchas decisiones tienen que ser tomadas tempranamente (método de perforación y profundidad, tipo de circuito a implementar, tipo de relleno a utilizar, etc.). El principal valor práctico del presente trabajo es que permite orientar el diseño de instalaciones geotérmicas que presentan condiciones de borde únicas, permitiendo tener una noción del rendimiento efectivo de la implementación previo a la ejecución.

Gracias a lo anterior se posibilita el aprovechamiento de una fuente de energía no utilizada a través de la implementación con circuitos de tuberías de estructuras que hasta ahora son ociosas en la etapa de operación de una edificación, como lo son las Pilas de entibación y sus respectivos Anclajes.

Se genera una ingeniería de diseño que mediante modelos y mediciones en terreno permite explorar el potencial efectivo de la implementación, pudiéndose tener una referencia del aporte térmico total con las actuales condiciones de borde y previo a la ejecución.

## 7.6 Futuras investigaciones

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones que pueden ser recogidas para servir de guía y apoyo al desarrollo de futuras investigaciones.

- En cuanto a las modelaciones, se propone hacer un análisis de costos en EED que permita determinar, por ejemplo, la conveniencia de implementar los anclajes debido al pequeño aporte en términos de carga que estos representan. A través de dicho análisis de costos se podría también determinar la conveniencia de aumentar el caudal de circulación en función de un aumento en la carga tomada por los distintos circuitos, ya que un mayor caudal también implica mayor energía consumida para movilizarlo.
- Se propone también incluir a las cargas *peak* y a la demanda de agua caliente sanitaria en los requerimientos energéticos al momento de realizar las modelaciones en EED, ya que esto permitiría saber el potencial que tendría el sistema de tomar este tipo de cargas.
- Otra propuesta relacionada con las modelaciones es la realización de un nuevo enfoque para abordar las condiciones de borde, sobre todo para el caso de los Anclajes, con el fin de generar modelaciones más aproximadas desde un comienzo y en donde no sea necesario realizar mediciones para validarlas. Para el caso de la Pila se podría considerar un nuevo radio que sea proporcional al área efectiva de contacto entre el suelo y el bulbo de temperatura. Para el caso de los Anclajes se propone considerarlos como verticales pero aplicando un flujo de calor geotérmico distinto en cada línea de anclajes para dar cuenta de su distinta profundidad.
- Con respecto a las mediciones, se propone realizarlas en época de invierno, ya que se pudo apreciar que la condición ambiental externa que más afectaba a los datos obtenidos era el aumento de temperatura, problema que se vería solucionado realizando las mediciones en días fríos. Además se podría mejorar la aislación tanto del equipo como de las conexiones, lo que generaría que el ensayo en terreno funcione de manera correcta tanto en invierno como en verano.
- Se propone también realizar mediciones en la Pila con mayor inyección de calor con el fin de acercarse a los límites de las condiciones de operación en base a recomendación de norma internacional (VDI 4640, 2001).

## **7.7 Conclusiones generales**

El presente trabajo representa un paso hacia adelante en el estudio más detallado del potencial y de los parámetros térmicos de implementaciones geotérmicas integradas constructivamente en la comuna de Santiago con la posibilidad de extender su aplicación práctica a otras comunas especialmente al sur del país gracias al mayor potencial observado en términos de calefacción de edificaciones.

Estudios anteriores entregan como resultados que tanto técnica como económicamente es posible realizar este tipo de implementaciones, mientras que este estudio arroja como resultado que las pilas de entibación y sus anclajes son eficaces en términos energéticos y que tienen un gran potencial de aplicación.

Las pilas y anclajes de entibación implementadas con tuberías para el intercambio de calor aparecen como una buena alternativa para que el país avance en la generación de energías renovables no convencionales y que de esa forma se vaya dependiendo cada vez menos de la generación de energía en base a combustibles fósiles. Ahora bien, se puede incluso implementar sólo las pilas de entibación, dejando de lado los anclajes, gracias a los buenos resultados alcanzados en el presente trabajo en términos de intercambio de calor por parte de las Pilas de entibación.

Se puede concluir finalmente que este tipo de tecnología es viable de implementar, tanto en términos económicos como energéticos, debiéndose incentivarla con el objetivo de que se masifique y que de esa forma se pueda aprovechar el gran potencial geotérmico que presenta Chile, siempre dentro de parámetros y estándares que aseguren su correcto funcionamiento.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Acuña, J., Fossa, M., Monzó, P., Palm, B., 2012. *Numerically generated g-functions for ground coupled heat pump applications*. Proceedings of the COMSOL Conference in Milan, 6 pp. Suecia.

Beg, N., Morlot, J.C., Davidson, O., Afrane-Okesse, Y., Tyani, L., Denton, F., Sokona, Y., Thomas, J.P., La Rovere, E.L., Parikh, J.K., Parikh, K., Rahman, A.A., 2002. *Linkages between climate change and sustainable development*. Climate Policy 2, 129–144. Francia.

BLOCON, 2008. *Earth Energy Designer 3.16*. [computer program] Buildingphysics. Available at: <<http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1099.htm>> [Consultado 30 septiembre 2013].

Boennec, O., 2008. *Shallow ground energy systems*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Energy 161. EN2, 57–61. UK.

Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique 56, 81–122. Vienna.

Decisión de la Comisión 2013/114/UE del 1 de Marzo de 2013 *por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías*, conforme a lo dispuesto en el artículo 5 de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

De Moel, M., Bach, P.M., Bouazza, A., Singh, R.M., Sun, J.O., 2010. *Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2683–2696. Australia.

Departamento de Geofísica (DGF), Universidad de Chile, 2013. *Observaciones locales: Información meteorológica en tiempo real* [en línea]. Available at: <<http://infomet.dgf.uchile.cl/OBSERVACIONES/observaciones.html>>. [Consultado 16 septiembre 2013].

Esen, H., Inalli, M., 2009. *In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazig, Turkey*. Energy and Buildings 41, 395–401. Turquía.

Eskilson, P., 1987. *Thermal analysis of the heat extraction boreholes*. Doctoral thesis, Lund University. Suecia.

Fischer, M., 2006. *Formalizing Construction Knowledge for Concurrent Performance-based Design*. 13th EG-IC Workshop: Intelligent Computing in Engineering and Architecture, Ascona, Switzerland, 25-30 Junio, 186–205. USA.

Florides, G., Kalogirou, S., 2008. *First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus*. Applied Thermal Engineering 28, 157–163. Cyprus.

Fossa, M., Cauret, O., Bernier, M., 2009. Comparing the thermal performance of ground heat exchanger of various lengths. Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Effstock, Stockholm, 8 pp. Italia.

- Gao, J., 2008. *Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application*. Applied Energy 85, 901–10. China.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K.S., Yang, J., 2008. *Thermal performance and ground temperatura of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study*. Applied Thermal Engineering 28, 2295–2304. China.
- Gehlin, S., 2002. *Thermal response test – Method development and evaluation*. Doctoral Thesis., Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology. Suecia.
- Guggisberg, G., 2012. *Perfeccionamiento del equipo thermal response test y estudio de rendimientos térmicos para el diseño de un sistema geotérmico de baja entalpía en sistemas de entibación*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Chile.
- Hellström, G., Sanner, B., Klugescheid, M., Gonka, T., Martensson, S., 1997. *Experiences with the borehole heat exchanger software EED*. Proceedings MEGASTOCK 97, Sapporo, pp. 247–252. Suecia.
- Ingersoll, L.R., Plass, H.J., 1948. *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump*. Heating, Piping & Air Conditioning 20(7): 119–122. USA.
- INTERNATIONAL GROUND SOURCE HEAT PUMP ASSOCIATION (IGSHPA), 2009. *Design and installation guide*. Oklahoma State University, USA
- INTERNATIONAL GROUND SOURCE HEAT PUMP ASSOCIATION (IGSHPA), 2011. *Closed-loop vertical borehole Design, Installation & Materials Standars*. Oklahoma State University, USA.
- Javed, S., Fahlén, P., Claesson, J., 2009. *Vertical ground heat exchangers: A review of heat flow models*. Proceedings of 11th International Congress on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability 86. Suecia.
- Kandula, M., 2011. *On the effective thermal conductivity of porous packed beds with uniform spherical particles*. J. Porous Media, vol. 14, No. 10, pp.919–926. USA.
- Kelvin, T.W., 1882. *Mathematical and physical papers*. Cambridge University Press, Londres.
- Lahsen, A., Muñoz, N., Parada, M.A., 2010. *Geothermal development in Chile*. Proceedings of the 2010 World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010, paper No. 0118, 7 pp. Chile.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011. *Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review*. Geothermics 40, 159–180. USA.
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A., 2013. *Thermal performance and economic evaluation of double U-tube borehole heat exchanger with three different borehole diameters*. Energy and Buildings 67, 217–224. Alemania.
- Mogensen, P., 1983. *Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages*. Proceedings of the international conference on subsurface heat storage in theory and practice, Stockholm, pp. 652–7. Suecia.

- Muñoz, M., Hamza, V., 1993. *Heat flow and temperature gradients in Chile*. Studia geoph. et geod. 37, 315–348. Chile.
- Muñoz, M., 2011. *Implementación de pilas de entibación y sus anclajes para el aprovechamiento geotérmico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Chile.
- Pahud, D., Hubbuch, M., 2007. *Measured thermal performances of the energy pile system of the Dock Midfield at Zürich Airport*. Proceedings European Geothermal Congress. Suiza.
- Pilotes Terratest S.A., 2009. Edificio PBBP Fac. Ingeniería, Universidad de Chile, Entibación y Socializado, Detalles Anclajes. Plano N° 09132-ANC-DET-003, Rev N° F. Chile.
- Rybach, L., Sanner, B., 2000. *Ground-source heat pump systems the European experience*. Geo-Heat Center Bulletin No 1. Alemania.
- Sanner, B., 2001. *Shallow geothermal energy*. GHC Bulletin No. 2, 19–25. Alemania.
- Sanner, B., Hellström, G., Splitter, J., Gehlin, S., 2005. *Thermal response test-current status and world-wide application*. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey. Alemania.
- Sanner, B., 2010. Buildingphysics.com [frequently asked questions] 11 Junio. Disponible en: <<http://www.buildingphysics.com/index-filer/Page1440.htm>> [Accedido 2 de Septiembre de 2013].
- Sharqawy, M.H., Said, S.A., Mokheimer, E.M., Habib, M.A., Badr, H.M., Al-Shayea, N.A., 2009. *First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia*. Renewable Energy 34, 2218–2223. USA.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., Kohl, T., 2007. *Numerical evaluation of thermal response tests*. Geothermics 36, 141–166. Suiza.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) 4640, 2001. *Thermal use of the underground–VDI 4640 part 2 Ground source heat pump systems*. Beuth Verlag, Berlin. Alemania.
- Vielma, M., 2013. *Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Chile.
- Wagner, I., Katzenbach, R., Clauss, F., 2012. *Análisis comparativo de normas Europeas existentes sobre sondas geotérmicas*. III Congreso de energía geotérmica, Madrid. España.
- Yavuzturk, C., 1999. *Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems*. Doctoral thesis, Oklahoma State University, USA. Alemania.

## ANEXOS

### **ANEXO A: Detalle de los daños en las tuberías**



Anexo A.1: Tubería del circuito de la Pila 100 cortada (03-04-2013).



Anexo A.2: Tuberías del circuito de la Pila 101 dobladas (03-04-2013).



Anexo A.3: Corte en una de las tuberías del circuito de los anclajes (03-04-2013).



Anexo A.4: Tuberías correspondiente al circuito de la Pila 101 quebrada debido a pérdida de flexibilidad por radiación (03-04-2013).

## ANEXO B: Ensayo de esfuerzo a tuberías



Anexo B.1: Muestra de tubería sacada de terreno quebrada al tratar de ser expandida (04-04-2013).

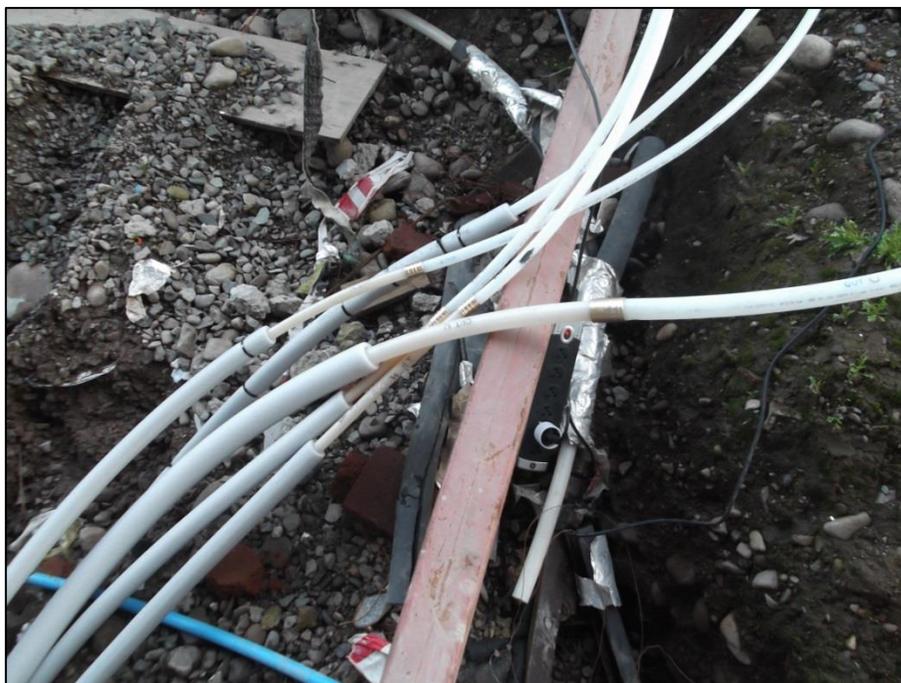


Anexo B.2: Detalle de muestra de tubería sacada de terreno quebrada al tratar de ser expandida (04-04-2013).

## ANEXO C: Reparación de las tuberías

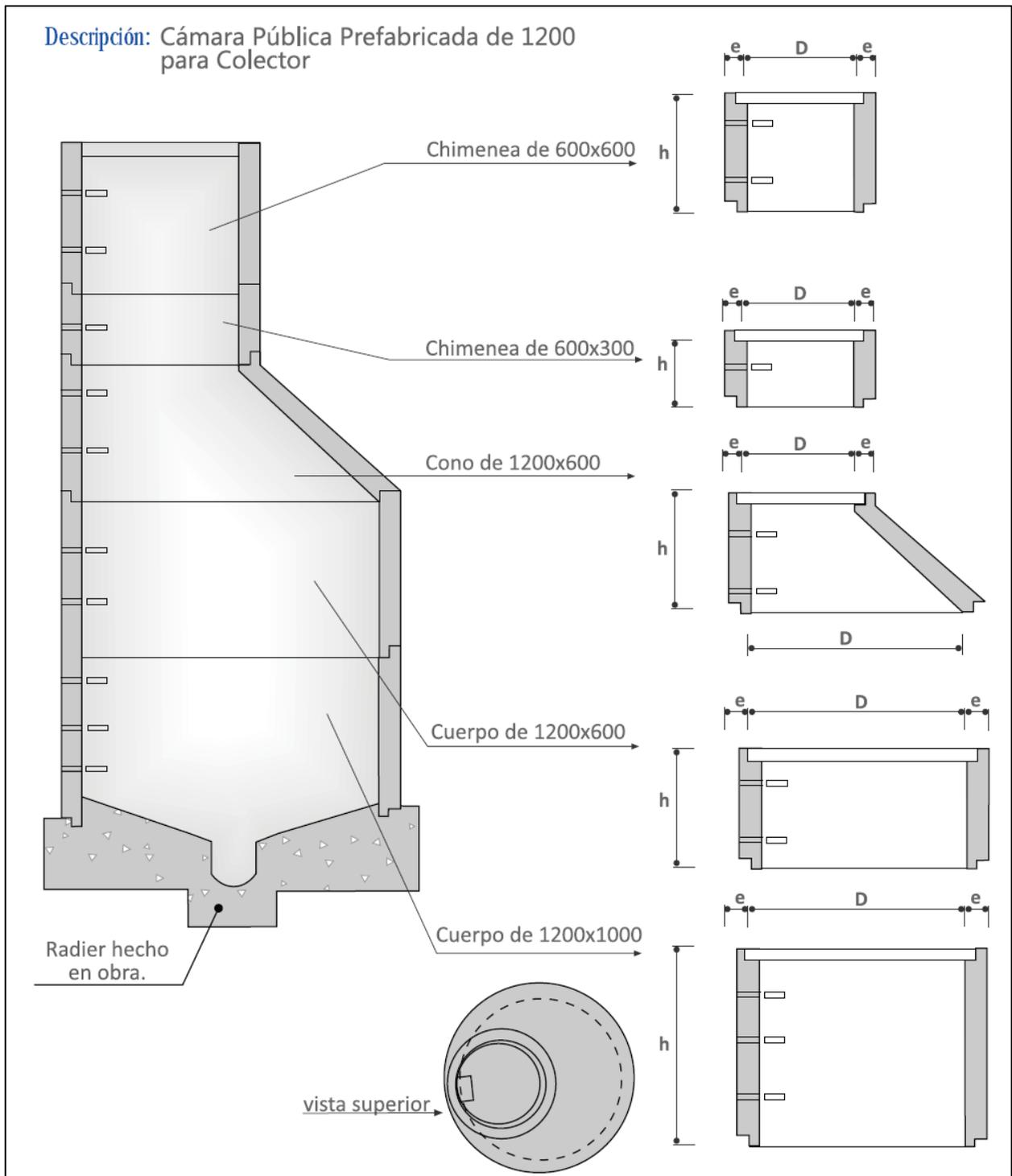


Anexo C.1: Conexión de tuberías nuevas mediante *fittings*, se aprecia la diferencia de colores entre tuberías.



Anexo C.2: Tuberías reemplazadas y cubiertas con aislante.

## ANEXO D: Descripción cámara de preservación



Anexo D.1: Detalle de la cámara de preservación (GRAU, 2013).

## ANEXO E: Detalle de modelos realizados en EED

### E.1 Pila única

Anexo E.1: Valores obtenidos a partir de la modelación de la configuración Pila única en EED.

Configuración Pila Única (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)							
Modelación	Conductividad [W/mK]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Tasa Extracción Máx [W/m]	Tasa Rechazo Máx [W/m]	Carga Anual [MWh]	
						Calefacción	Refrigeración
1	0,902	Agua	12	48,19	56,36	4,99	2,98
2	0,902	Agua	8,5	44,99	52,79	4,68	2,8
3	0,902	Agua Glicolada	12	63,21	55,98	6,45	2,95
4	0,902	Agua Glicolada	8,5	62,82	55,61	6,43	2,94
5	0,682	Agua	12	41,11	46,22	4,25	2,44
6	0,682	Agua	8,5	38,87	43,77	4,03	2,32
7	0,682	Agua Glicolada	12	53,88	46,78	5,51	2,47
8	0,682	Agua Glicolada	8,5	53,69	46,59	5,49	2,46
9	0,567	Agua	12	36,74	40,02	3,8	2,12
10	0,567	Agua	8,5	35,09	38,32	3,63	2,03
11	0,567	Agua Glicolada	12	48,24	41,14	4,93	2,17
12	0,567	Agua Glicolada	8,5	48,05	40,95	4,91	2,16

### E.2 Línea de 10 Pilas separadas a 3 [m]

Anexo E.2: Valores obtenidos a partir de la modelación de la configuración Línea de 10 Pilas separadas a 3 [m] en EED.

Configuración Línea de 10 Pilas con separación = 3 [m] (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)							
Modelación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Tasa Extracción Máx [W/m]	Tasa Rechazo Máx [W/m]	Carga Anual [MWh]	
						Calefacción	Refrigeración
13	0,902	Agua	12	49,43	54,86	50,9	29,07
14	0,902	Agua	8,5	46,16	51,38	47,71	27,31
15	0,902	Agua Glicolada	12	60,23	58,52	61,44	30,89
16	0,902	Agua Glicolada	8,5	59,99	58,24	61,19	30,75
17	0,682	Agua	12	43,06	46,91	44,45	24,94
18	0,682	Agua	8,5	40,77	44,52	42,03	23,61
19	0,682	Agua Glicolada	12	52,71	51,02	53,78	26,94
20	0,682	Agua Glicolada	8,5	52,45	50,82	53,6	26,84
21	0,567	Agua	12	38,76	41,67	40,01	22,14
22	0,567	Agua	8,5	36,93	39,72	38,09	21,09
23	0,567	Agua Glicolada	12	47,54	45,75	48,53	24,17
24	0,567	Agua Glicolada	8,5	47,41	45,61	48,38	24,09

### E.3 Línea de 5 Pilas separadas a 6 [m]

Anexo E.3: Valores obtenidos a partir de la modelación de la configuración Línea de 5 Pilas separadas a 6 [m] en EED.

Configuración Línea de 5 Pilas con separación = 6 [m] (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)							
Modelación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Tasa Extracción Máx [W/m]	Tasa Rechazo Máx [W/m]	Carga Anual [MWh]	
						Calefacción	Refrigeración
25	0,902	Agua	12	51,02	57,98	26,35	15,36
26	0,902	Agua	8,5	47,69	54,33	24,63	14,4
27	0,902	Agua Glicolada	12	63,79	59,93	32,56	15,83
28	0,902	Agua Glicolada	8,5	63,55	59,7	32,42	15,76
29	0,682	Agua	12	43,73	48,36	22,58	12,82
30	0,682	Agua	8,5	41,3	45,84	21,33	12,13
31	0,682	Agua Glicolada	12	54,86	51,02	27,99	13,47
32	0,682	Agua Glicolada	8,5	54,61	50,76	27,89	13,41
33	0,567	Agua	12	39,29	42,57	20,26	11,29
34	0,567	Agua	8,5	37,34	40,5	19,27	10,74
35	0,567	Agua Glicolada	12	49,3	45,39	25,16	11,99
36	0,567	Agua Glicolada	8,5	49,09	45,24	25,09	11,95

### E.4 Circuito Anclajes de distinta inclinación

Anexo E.4: Valores obtenidos a partir de la modelación para el circuito de Anclajes con distintas inclinaciones en EED.

Circuito Anclajes (criterio de maximización en base a aspectos técnicos)						
Modelación	Ángulo Inclinación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Carga Anual [MWh]	
					Calefacción	Refrigeración
A1	15°	0,682	Agua Glicolada	12	0,82	0,35
A2	20°	0,682	Agua Glicolada	12	1,10	0,48
A3	25°	0,682	Agua Glicolada	12	1,35	0,58
A4	30°	0,682	Agua Glicolada	12	1,60	0,69
A5	35°	0,682	Agua Glicolada	12	1,83	0,78

## E.5 Pila única con criterio de conservación ambiental

Anexo E.5: Valores obtenidos a partir de la modelación de configuración de Pila única aplicando criterio de conservación ambiental en EED.

Configuración Pila Única (criterio conservación ambiental)							
Modelación	Conductividad [W/(mK)]	Fluido Circulante	Caudal [LPM]	Tasa Extracción Máx [W/m]	Tasa Rechazo Máx [W/m]	Carga Anual [MWh]	
						Calefacción	Refrigeración
1Amb	0,902	Agua	12	38,76	33,2	3,98	1,77
2Amb	0,902	Agua	8,5	36,42	31,09	3,74	1,65
3Amb	0,902	Agua Glicolada	12	35,98	30,68	3,7	1,63
4Amb	0,902	Agua Glicolada	8,5	35,84	30,57	3,68	1,63
5Amb	0,682	Agua	12	32,99	27,13	3,39	1,44
6Amb	0,682	Agua	8,5	31,32	25,66	3,22	1,37
7Amb	0,682	Agua Glicolada	12	31	25,38	3,19	1,35
8Amb	0,682	Agua Glicolada	8,5	30,89	25,29	3,18	1,35
9Amb	0,567	Agua	12	29,5	23,46	3,03	1,25
10Amb	0,567	Agua	8,5	28,18	22,32	2,9	1,19
11Amb	0,567	Agua Glicolada	12	27,94	22,11	2,87	1,18
12Amb	0,567	Agua Glicolada	8,5	27,85	22,04	2,86	1,17

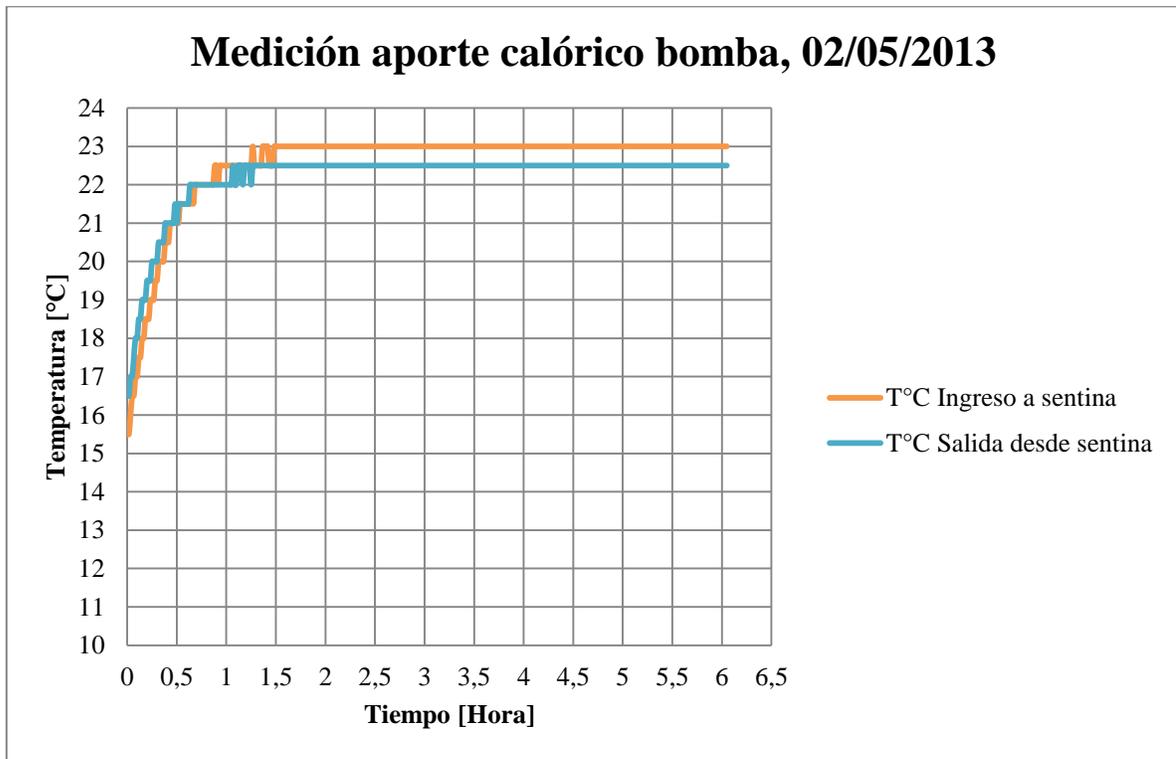
## ANEXO F: Procedimiento de calibración equipo TRT

El procedimiento para obtener la cantidad de calor que aporta la bomba al fluido es el descrito en Guggisberg (2012). En términos generales, el objetivo es recrear un medio infinito con condiciones controladas en el cual haya una fuente lineal de calor. En este caso, dichos requisitos se cumplen al introducir en una sentina de grandes dimensiones (54 [m<sup>3</sup>] de volumen de agua) un circuito cerrado de tuberías (18 [mm] de diámetro y 38 [m] de largo), el cual simula un BHE. La medición comienza con un balance térmico entre el agua al interior del circuito de tuberías y el agua en la sentina, por lo que cualquier aumento en la temperatura del agua al interior de las tuberías se deberá al calor entregado por la bomba al interior del TRT. La Figura Anexo F.1 muestra la instalación anteriormente descrita, implementada en el laboratorio. Se puede ver la sentina, que simula el medio infinito, y las tuberías de color verde que hacen las veces de BHE



Anexo F.1: Instalación del equipo TRT en laboratorio para la medición del aporte calórico de la bomba.

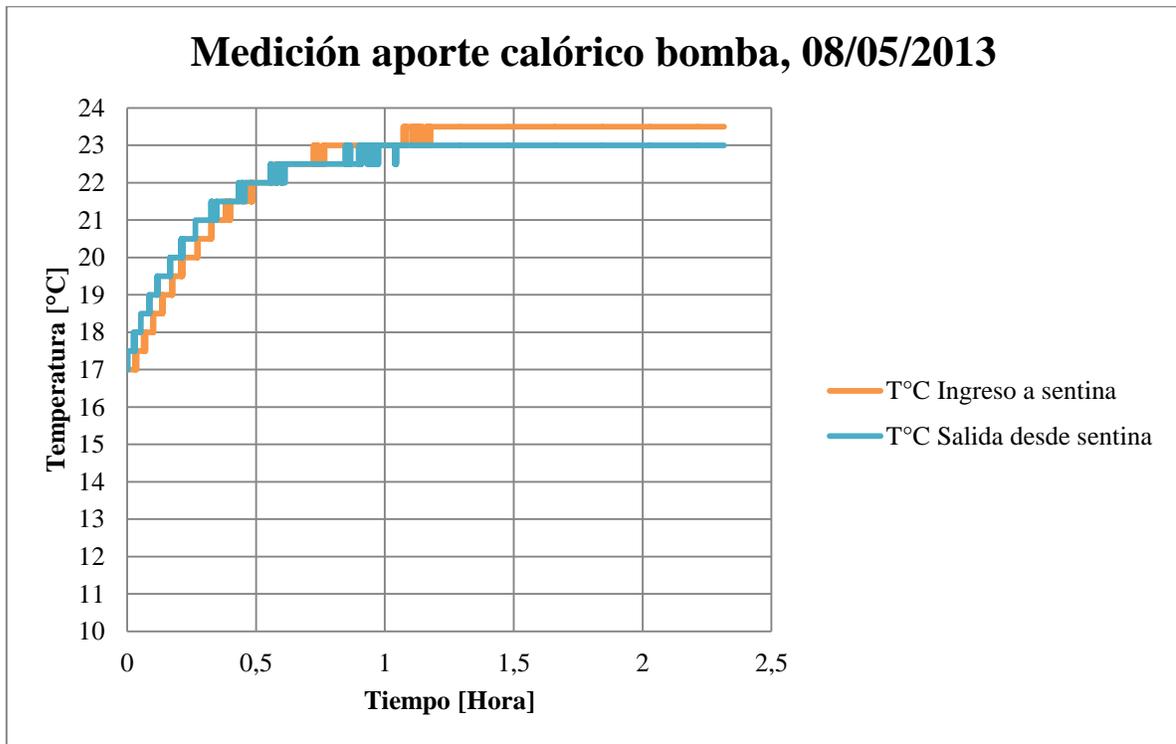
Desde la Figura Anexo F.2 hasta la Figura Anexo F.8 se muestran las cuatro mediciones realizadas para obtener el aporte calórico de la bomba. Las Tablas Anexo F.3 a la Anexo F.9 muestran un resumen de los parámetros necesarios para obtener el aporte calórico a partir de las mediciones realizadas.



Anexo F.2: Medición aporte calórico bomba 02/05/2013.

Anexo F.3: Valores obtenidos durante la calibración realizada el 02/05/2013.

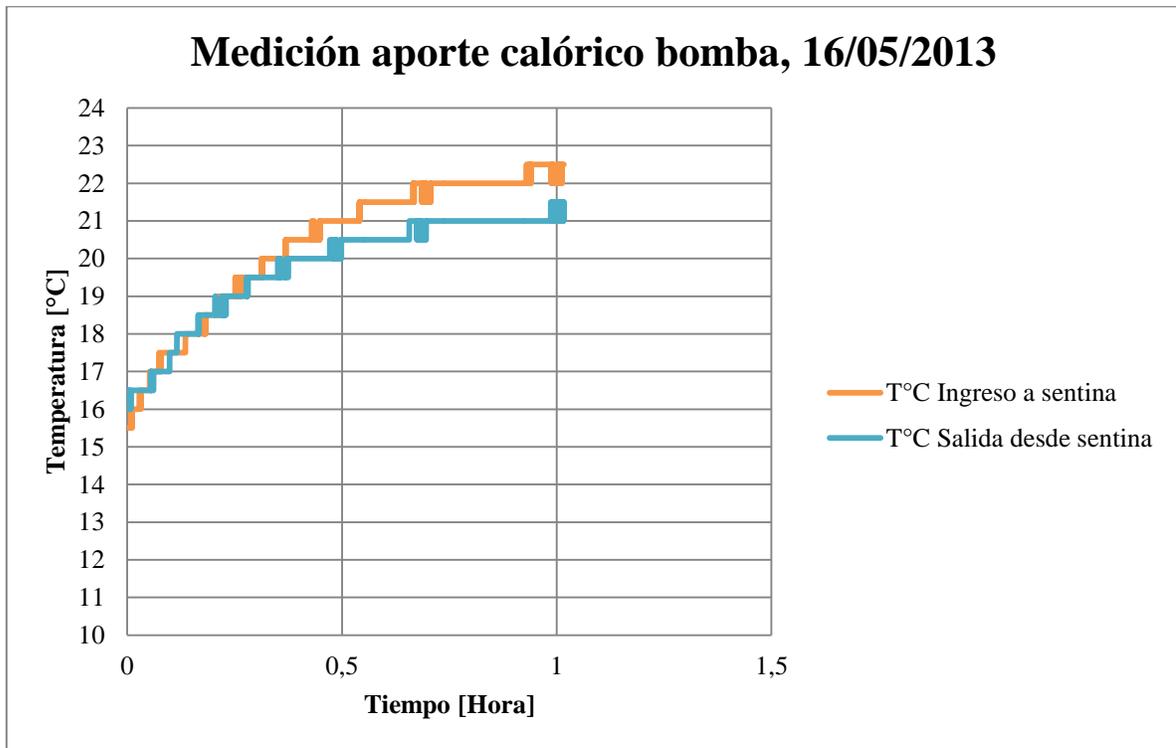
Parámetro	Valor
T [°C] Medio	15,5
T [°C] Fluido	15,5
Volumen Sistema [L]	15,87
Duración aumento lineal de Temperatura [min]	29
T [°C] Media al final del aumento lineal	21,25
Caudal [L/min]	17
Potencia Bomba [W]	1.450,4



Anexo F.4: Medición aporte calórico bomba 08/05/2013.

Anexo F.5: Valores obtenidos durante la calibración realizada el 08/05/2013.

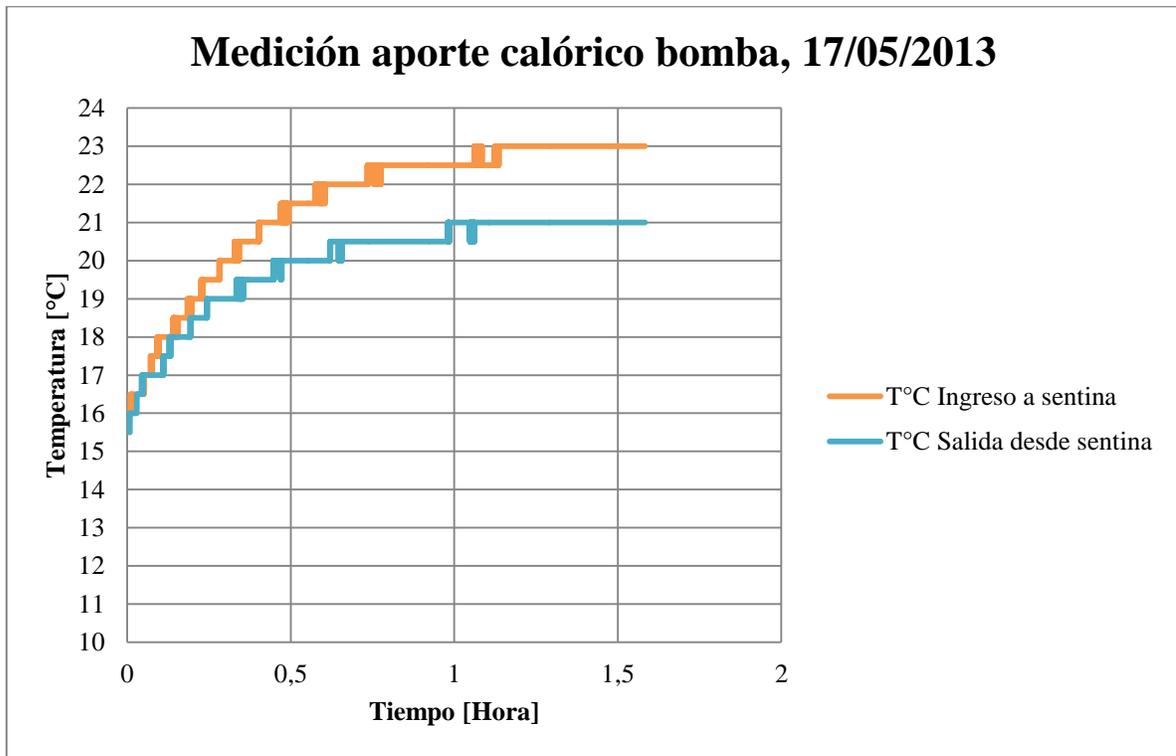
Parámetro	Valor
T [°C] Medio	15,6
T [°C] Fluido	15,6
Volumen Sistema [L]	15,87
Duración aumento lineal de Temperatura [min]	30
T [°C] Media al final del aumento lineal	22
Caudal [L/min]	18
Potencia Bomba [W]	1.529



Anexo F.6: Medición aporte calórico bomba 16/05/2013.

Anexo F.7: Valores obtenidos durante la calibración realizada el 16/05/2013.

Parámetro	Valor
T [°C] Medio	14,7
T [°C] Fluido	14,7
Volumen Sistema [L]	15,87
Duración aumento lineal de Temperatura [min]	30
T [°C] Media al final del aumento lineal	20,75
Caudal [L/min]	6
Potencia Bomba [W]	1.365



Anexo F.8: Medición aporte calórico bomba 17/05/2013.

Anexo F.9: Valores obtenidos durante la calibración realizada el 17/05/2013.

Parámetro	Valor
T [°C] Medio	14,6
T [°C] Fluido	14,6
Volumen Sistema [L]	15,87
Duración aumento lineal de Temperatura [min]	30
T [°C] Media al final del aumento lineal	20,75
Caudal [L/min]	4
Potencia Bomba [W]	1.342

Para calcular el aporte calórico se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = C_e \cdot M \cdot \Delta T \quad (5)$$

Dónde:

- $Q$  [Ws]: Energía generada.
- $C_e$  [Cal/°C/gr]: Calor específico del fluido.
- $M$  [gr]: Masa del fluido.
- $\Delta T$  [°C]: Variación de la temperatura.

Aplicando la Fórmula (5) se obtiene la energía aportada al fluido, la que dividida por el tiempo que duró el aumento lineal de la temperatura, permite obtener la potencia que la bomba le aportó al sistema.