



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

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

GABRIEL IGNACIO GUGGISBERG ALARCÓN

PROFESOR GUÍA:

MAURICIO TOLEDO VILLEGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

POR: GABRIEL GUGGISBERG ALARCON

PROFESOR GUÍA: MAURICIO TOLEDO VILLEGAS

“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”

Actualmente la geotermia ha comenzado su explotación con la finalidad de generación eléctrica mediante una producción limpia con bajos niveles de contaminación en comparación a las generaciones convencionales. Esta línea de estudio apunta a un aprovechamiento de las propiedades térmicas del suelo y no a la generación eléctrica, mediante la obtención de calor o frío que otorgan las propiedades del terreno que a primera vista satisfacen tanto las necesidades de verano como las de invierno, pues el suelo mantiene una temperatura constante entre los 5 y 30 metros de profundidad, temperatura que mediante nuevas tecnologías puede ser absorbida, en este caso con agua, y transportada para abastecer sistemas de climatización como sistemas de agua caliente sanitaria. En la primera etapa de estudio de la utilización de geotermia de baja entalpía enfocada a la edificación (Muñoz, 2011) se implementaron dos Pilas de entibación y sus correspondientes Anclajes con el objetivo de medir el potencial geotérmico de estos elementos embebidos en el subsuelo. El presente trabajo tiene como objetivo continuar el desarrollo de conocimiento acerca del potencial aprovechamiento geotérmico de estas instalaciones.

El trabajo se desarrolló en el periodo de construcción del proyecto Beauchef 851, perteneciente al edificio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, entre Septiembre del 2011 y Mayo del 2012, abarcando tres líneas principales; estudio y re-diseño del equipo de medición “Thermal Response Test” (TRT), mediciones en terreno entre Diciembre 2011 y Abril 2012, y finalmente estudio del rendimiento energético de las instalaciones. El equipo TRT mejorado permitió realizar una serie de mediciones exitosas para la obtención de parámetros de diseño de las instalaciones, como conductividad térmica tanto para la Pila como para los Anclajes y el rendimiento energético de estas mismas instalaciones. Las mediciones en terreno fueron variadas, utilizando distintas metodologías según el parámetro o información que se quisiera obtener, en este trabajo se definieron mediciones para conocer la influencia de la exposición a condiciones ambientales de las instalaciones, mediciones para conocer la temperatura inalterada tanto de la Pila como de los Anclajes, y finalmente mediciones para la obtención de la conductividad térmica de las instalaciones. Mediante las mediciones realizadas se caracterizó la temperatura interna de las instalaciones, obteniendo perfiles de variación diaria de acuerdo a la temperatura ambiental, durante el periodo en que la Pila se encontraba expuesta a condiciones ambientales (parcialmente) en un 46%. Con todas las mediciones analizadas se definió la conductividad térmica de una Pila con el valor de 1,6 W/mK y un valor de 1,7 W/mK para los Anclajes. Con esto se obtuvo finalmente el rendimiento de un sistema geotérmico implementado en el interior de estructuras de sostenimiento, alcanzado valores de 150 W/mK en el caso de las Pilas y 100 W/mK en el caso de los Anclajes como tasas de rechazo de calor para la carga térmica aplicada de 4500 W en promedio.

Agradecimientos

Aprender de la casa las buenas prácticas a la hora de realizar labores manuales fue fundamental para realizar el armado del TRT durante la memoria, esta experiencia adquirida en el patio de mi casa con mi Padre pero perfeccionada gracias al aporte de Omar González y Mario Carrillo amigos del Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados quienes siempre me apoyaron y participaron de las decisiones tomadas en esta etapa del trabajo fue fundamental para el éxito y cumplimiento de los primeros objetivos planteados.

El trabajo ordenado y estructurado para avanzar en la búsqueda de los objetivos claves de la memoria pasó principalmente por las metodologías que el Profesor Mauricio Toledo me planteó desde el principio del trabajo, método de trabajo que no adquirí a lo largo de la Universidad pero que para esta oportunidad me ceñí en todo momento, encontrándole un gran valor al hecho de producir lento, pero seguro.

Durante el desarrollo del trabajo siempre conté con mi segunda casa en mi época universitaria (Universidad y Laboratorio de sólidos y medios Particulados), pero también apoyado por algunas amistades conocí al personal del laboratorio de Hidráulica quienes fueron capaces de solucionar problemas que por mi cuenta no hubiese logrado terminar en el tiempo que se hizo (Manuel y Carlos).

El éxito de un trabajo de investigación viene de la mano con la insistencia y perseverancia a la hora de solucionar los problemas, características personales adquiridas en la vida, que en su mayoría fueron apoyadas y en ciertas ocasiones criticadas, pero que gracias al apoyo de mi querida madre Militza Alarcón Contreras, querido padre Manuel Guggisberg Encalada y mi querida y bella hermanita Renata Guggisberg Alarcón quien me escuchó mil y una vez si la tesis avanzaba o no, quienes sumados a otras amistades ayudaron a sacar adelante el proyecto.

Además del apoyo directo con que conté durante el avance de la memoria, hubo mucha gente involucrada durante su desarrollo, con quienes compartí mi tiempo tanto en el laboratorio como Marcelo Vargas y otros compañeros, como también quienes me fueron incondicionales durante esta etapa de mi vida en la Universidad (Fernanda G. Abarzúa Torres) y como olvidar a quienes siempre buscaron saber si todo andaba bien como mis queridas hermanas Bárbara Guggisberg, María Luisa Guggisberg y la familia Abato.

Importante es recordar a mi mentor en el tema, quien siempre estuvo dispuesto a traspasarme los conocimientos adquiridos o conversar acerca de las dudas, Mario Orlando Muñoz, hoy Ingeniero Civil quien comenzó junto al Profesor Mauricio Toledo esta desafiante investigación.

Una mención especial a quien siempre me acompañó y me entregó los momentos de mayor relax en la Universidad, el Basquetbol y mi querido equipo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile.

INDICE GENERAL

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA	ii
Agradecimientos	iii
INTRODUCCIÓN	1
1.1. General.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Alcance	2
1.4. Ámbito de Aplicación.....	4
1.5. Etapas generales del desarrollo de la memoria.....	4
2. DESCRIPCIÓN DEL TERRENO EXPERIMENTAL.....	5
2.1. Condiciones en terreno	5
2.2. Condiciones Ambientales	6
2.3. Condiciones del Suelo	6
3. PILAS Y ANCLAJES ENERGÉTICOS (EP+A).....	8
3.1. Instalaciones Implementadas en Beauchef 851	8
3.2. Descripción del Sistema de Energy Piles y Anclajes.....	10
3.3. Exposición al ambiente de EP+A	10
4. REDISEÑO DEL EQUIPO THERMAL RESPONSE TEST.....	14
4.1. TRT.....	14
4.2. Diseño del TRT y circuito interno.	16
4.3. Aislación térmica del equipo	18
4.4. Funcionamiento Equipo TRT	20
5. TEORÍA DE INGERSOLL & PLASS PARA LA OBTENCION DE LA CONDUVTIVIDAD TÉRMICA DEL SUELO.....	23
5.1. Teoría y modelo matemático utilizado	23
5.2. Teoría de Análisis	24
5.3. Solución analítica al problema de Ingersoll & Plass (1948).....	25
6. MEDICIONES EN TERRENO	27
6.2. Toma de datos de sensores embebidos en calicata	29
6.3. Mediciones de aporte de calor de la Bomba hidráulica	30
6.4. Mediciones con suelo no perturbado	32
6.4.1 Mediciones Dinámicas	32
6.4.2 Mediciones Estáticas	35
6.5. Mediciones con calefactor encendido.....	39

7.	OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA.....	45
7.1	Análisis Caso Anclajes (Sondajes Inclinados).....	51
8.	ANÁLISIS DE LA TASA DE EXTRACCIÓN DE CALOR.....	55
8.1.	Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones sin fuente de calor (calefactor)...	56
8.2.	Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones con fuente de calor Enero-Marzo (calefactor).....	57
8.3.	Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones con fuente de calor Abril (calefactor).....	58
9.	EVALUACIÓN DE DISEÑO PARA MEDIR EL APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LAS PILAS Y ANCLAJES ENERGÉTICOS	60
9.1.	Primer dimensionamiento de una instalación	61
9.2.	Consideraciones al utilizar norma VDI 4640	62
9.3.	Aplicación de norma VDI 4640 para la obtención de largos de sondajes en Pilas de acuerdo a una demanda energética.	63
9.4.	Aplicación de la Norma VDI 4640 para la obtención de la demanda energética suplida con Anclajes	68
9.5.	Análisis del rendimiento térmico (W/m) de la Pila y Anclajes	71
9.6.	Anclaje inclinado y su comportamiento como sondaje vertical	72
10.	ESTADO DEL ARTE EN DISEÑO DE PILAS ENERGÉTICAS	75
11.	CONCLUSIONES.....	78
	Comportamiento térmico de Pila y Anclaje	78
	Rendimiento energético de Pilas y Anclajes	79
	Anclaje excepción	80
	Recomendaciones.....	80
12.	REFERENCIAS	83

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Preguntas planteadas durante la memoria para asignar tareas a cada objetivo.	3
Figura 2. Ubicación de Pila de Entibación y sus Anclajes en Proyecto Beauchef 851.	5
Figura 3. Variación anual de temperatura en Santiago 2011 (DGF U. de Chile).	6
Figura 4. Estratigrafía del suelo del Proyecto Beauchef 851.	7
Figura 5. Modelo de Pila de Entibación y sus Anclajes (Pilotes Terratest S.A 2009).	8
Figura 6. Representación gráfica de las instalaciones en terreno (Muñoz, 2011).	9
Figura 7. Programa de mediciones en Terreno.	10
Figura 8. Tensores de acero de los Anclajes expuestos a condiciones de exposición ambiental.	11
Figura 9. Diagrama de las condiciones de la implementación en terreno.	12
Figura 10. Muro perimetral que cubrirá las tuberías de los Anclajes.	13
Figura 11. Thermal Response Test Desarrollado en la FCFM, Universidad de Chile. 11a representa la vista interior del equipo mostrando los componentes principales. 11b muestra una vista exterior lateral del equipo TRT en el laboratorio de Sólidos, Medios particulados y Estructuras de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.	15
Figura 12. Circuito interno de Thermal Response Test FCFM.	17
Figura 13. Diagrama del TRT en software Solid Edge ST4.	17
Figura 14. Corte del recubrimiento del equipo TRT.	18
Figura 15. Estructura de Aluminio para el montaje del cierre del equipo TRT.	19
Figura 16. Funcionamiento del Calefactor del TRT.	21
Figura 17. Sensor USB de temperatura – Rotatómetro.	21
Figura 18. Comportamiento del suelo en profundidad (Ericsson, 1985).	23
Figura 19. Representación de las variables de Ingersoll & Plass en la implementación.	24
Figura 20. Imagen de TRT en terreno sobre las Pilas. 20a muestra el equipo TRT en la Obra al mes de Diciembre. 20b muestra el momento en que el equipo TRT es transportado por la grúa torre hacia el interior de la Obra.	27
Figura 21. Diagrama de procesos generales.	28
Figura 22. Perfil térmico de calicata en las cercanías de la Pila y Anclajes.	29
Figura 23. TRT midiendo el aporte de la bomba hidráulica en laboratorio de Hidráulica.	30
Figura 24. Medición del aporte de calor con Bomba Hidráulica Laboratorio de Hidráulica.	31
Figura 25. Representación gráfica del comportamiento térmico de la Pila fecha 19/01/12.	33
Figura 26. Representación gráfica del comportamiento térmico de la Pila fecha 23/01/12.	33
Figura 27. Representación gráfica del comportamiento térmico del Anclaje 24/01/12.	34
Figura 28. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación a la fecha 26/01/12.	35
Figura 29. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación a la fecha 1/02/12.	35
Figura 30. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación 20/03/12- 21/03/12.	36
Figura 31. Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes a la fecha 26/01/12.	36
Figura 32. Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes a la fecha 01/02/12.	37
Figura 33. Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes 20/03/12-21/03/12.	37
Figura 34. Resumen de datos obtenidos para Pila de Entibación (Pila Energética).	38
Figura 35. Resumen de datos obtenidos para los Anclajes.	38
Figura 36. Medición in situ TRT en Pila triple-U a la fecha 21/03/12.	39

Figura 37. Medición in situ TRT en Pila triple-U a la fecha 26/03/12.....	40
Figura 38. Medición in situ TRT en Pila triple-U a la fecha 17/04/12.....	40
Figura 39. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 22/03/12.	41
Figura 40. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 27/03/12.	42
Figura 41. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 20/04/12.	42
Figura 42. Medición in situ TRT en Anclaje 2 a la fecha 18/04/12.	43
Figura 43. Medición in situ TRT en Anclaje 2 a la fecha 19/04/12.	43
Figura 44. Medición nº 1: Pila de Entibación.....	46
Figura 45. Medición nº 2: Pila de Entibación.....	46
Figura 46. Medición nº 3: Anclaje 1.....	47
Figura 47. Medición nº 4: Anclaje 1.....	47
Figura 48. Medición nº 5: Anclaje 2.....	48
Figura 49. Medición nº 6: Anclaje 2.....	48
Figura 50. Geometría de una fuente lineal inclinada (Cui et al., 2010).	51
Figura 51. Perfil de temperaturas a lo largo de la profundidad “Borehole inclinado” para diferentes radios (Cui et al., 2010).	53
Figura 52. Perfil de temperaturas a lo largo de la profundidad “Borehole vertical” para diferentes radios (Zeng et al., 2002).	53
Figura 53. Problema de condiciones de borde de Anclajes.....	54
Figura 54. Primera Ronda de mediciones en terreno (2012) sin calefactor.	56
Figura 55. Segunda Ronda de mediciones en terreno (2012) con calefactor.	57
Figura 56. Tercera Ronda de mediciones en terreno.....	58
Figura 57. Edificio implementado en Frankfurt am Main y Radiografía de calor en el Suelo.....	59
Figura 58. Compensación de largos entre diseño con 1 sondaje y 2 sondajes del VDI 4640.	63
Figura 59. Nomograma de la norma VDI 4640.....	67
Figura 60. Gráfica de la variación del factor alfa del Nomograma.	69
Figura 61. Análisis del alcance térmico de un Anclaje según VDI4640 (II).....	70
Figura 62. Rendimientos Térmicos en función de la Potencia o Calor inyectada.....	71
Figura 63. Anclajes Inclinados y su Equivalencia como sondaje vertical.....	72
Figura 64. Máximos valores en que Anclaje y Pila tienen mismo comportamiento térmico (Desconocidos).	73
Figura 65. Inyección y extracción de calor en el suelo de un proyecto geotérmico.....	75
Figura 66. Responsabilidades del diseñador de una Pila Geotérmica	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tramitancia térmica por zona en Chile (CChC, 2011).....	19
Tabla 2. Valores en medición.	31
Tabla 3. Medición 1 Pila triple U.	46
Tabla 4. Medición 2 Pila triple U.	46
Tabla 5. Medición 3 Anclaje 1.	47
Tabla 6. Medición 4 Anclaje 1.	47
Tabla 7. Medición 5.....	48
Tabla 8. Medición 6.....	48
Tabla 9. Resumen de valores obtenidos de conductividad térmica por instalación.	49
Tabla 10. Análisis de tasa de extracción utilizando la bomba hidráulica como fuente.....	56
Tabla 11. Análisis de tasa de extracción utilizando el calefactor como fuente Enero.	57
Tabla 12. Análisis de tasa de extracción utilizando el calefactor como fuente de calor Abril.	58
Tabla 13. Variación de temperatura según tasa de rechazo de calor.....	61
Tabla 14. Condiciones climáticas propuestas.....	64
Tabla 15. Análisis de gasto energético área tipo.	64
Tabla 16. Área abastecida según estudio.....	65
Tabla 17. Energía y Potencia que suple un Anclaje de acuerdo a la VDI 4640 (II).....	69
Tabla 18. Área posible de satisfacer térmicamente con el uso Anclaje.	70
Tabla 19. Resumen de consideraciones de diseño de Instalaciones geotérmicas.....	77

INTRODUCCIÓN

1.1. General

En la actualidad la climatización de edificios cuenta con dos graves problemas; en primer lugar es una de las fuentes de mayor gasto energético a nivel de país (PNUMA, 2010), y por otro lado es una de las principales causantes de los graves daños de la atmósfera por la alta tasa de liberación de gases con efecto invernadero.

El aprovechamiento geotérmico de baja entalpía es el nuevo concepto a desarrollar para lograr impactar las cifras de gasto energético por climatización, en particular el estudio de pozos mayormente conocido como “*Boreholes*” ya tiene un fuerte apoyo y participación en el mercado Europeo, Chino y Norte Americano, con más de 20 años de desarrollo, se ha demostrado la factibilidad de su uso, funcionamiento comprobado por muchos investigadores en el área de desarrollo energético por lo cual el uso de Boreholes tanto en edificios comerciales, residenciales o casas ya tiene cuantiosas investigaciones circulando por el mundo (De Moel et al., 2010).

La introducción de este sistema de pozos para el aprovechamiento del equilibrio térmico existente en el suelo en el interior de un sistema de entibación es el desafío que se estudia hoy en el proyecto Beauchef 851, ubicado en Avenida Beauchef 851, comuna de Santiago, Chile. Edificio perteneciente a la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.

La incorporación de un sistema de tuberías al interior del sistema de entibación embebido en el corte del muro excavado para el proyecto es lo que hoy llamamos Energy Piles, de la misma forma se trata de utilizar la idea de los Borehole en los Anclajes. Esta etapa fue el primer paso y desafío realizado (Muñoz, 2011).

Una vez finalizada la primera etapa del estudio (Muñoz, 2011) se definieron los principales problemas y deficiencias en información para continuar avanzando, particularmente en este caso las condiciones de medición en terreno no eran óptimas y tampoco el equipo de medición utilizado por lo cual fue necesario planificar y programar cada acercamiento al terreno. Este innovador desafío planteado recientemente en algunos centros de investigación como Oklahoma State University (EE.UU), Escuela Politécnica Federal de Lausanne (Suiza), VirginiaTech (EE.UU) y otras de renombre internacional, no cuenta con el suficiente avance en información, principalmente por la dificultad de la implementación en obra y la falta de proyectos que permitan involucrar en una etapa constructiva una investigación invasiva que conlleve cambios significativos en la programación inicial del proyecto, problemas que se han podido superar en este caso con el apoyo de todas las partes involucradas en el desarrollo del Proyecto Beauchef 851. Ante esta problemática es fundamental desarrollar conocimiento mediante pruebas experimentales en terreno y conocer in-situ los problemas a los que posiblemente se pueda ver enfrentado el estudio.

El desafío actual involucra comprender, parametrizar y modelar con mayor precisión el alcance de esta implementación, para así poder llevar a cabo la segunda etapa de un proyecto

de estas características, conectar las instalaciones con equipos mecánicos que utilicen este calor(frío) obtenido desde el suelo, para satisfacer parcialmente las demandas térmicas de un proyecto. El desarrollo de este proyecto, es parte del estado del arte en el uso de la geotermia de baja entalpía para su utilización directa en edificaciones.

La base conceptual de esta memoria nace del término Borehole Heat Exchanger (BHE), el cual funciona como un intercambio de calor entre el suelo (medio) y un fluido sometido inicialmente a condiciones ambientales, fluido que mediante la circulación por un medio semi-infinito logra aprovechar la temperatura constante existente en el suelo pudiendo reducir su temperatura (Verano) o aumentar su temperatura (Invierno). Para lograr este intercambio de calor es fundamental estimar el potencial de aprovechamiento térmico, conocer cómo varía la temperatura al interior del área por climatizar, valor que tendrá influencia directa en la temperatura de entrada al suelo del líquido re-circulante, conocer la estratigrafía del suelo donde estará instalado el sistema, esto debido a la influencia de corrientes convectivas sobre las instalaciones debido a las napas subterráneas que pudiesen encontrarse en el suelo de fundación.

1.2. Objetivos

Desarrollar un equipo de medición geotérmica mejorado para realizar las mediciones necesarias en terreno y obtener los parámetros fundamentales para el diseño de una instalación geotérmica (Conductividad térmica efectiva suelo-cemento) en el periodo de verano, con la finalidad de analizar los datos obtenidos y la obtención de parámetros de diseño para la implementación geotérmica de Pilas de entibación y sistemas de Anclajes.

1.3. Alcance

La memoria ha sido desarrollada principalmente en dos zonas de trabajo, la primera etapa se realizó en la Laboratorio de sólidos y medios Particulados del departamento de ingeniería Civil de la Universidad de Chile, acá se estudió e implementó la nueva versión del equipo Test de respuesta térmica con que se realizaron las mediciones en terreno. Es importante mencionar que el desarrollo de un proyecto de esta categoría tiene una inclusión multidisciplinaria de la Ingeniería, por este motivo el equipo TRT pasó también por las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile. Una vez aprobado los cambios del equipo y con un funcionamiento óptimo de este se llevó al terreno del proyecto Beauchef 851.

El proyecto Beauchef 851, integró más de 100 Pilas de entibación en su desarrollo con sus correspondientes Anclajes y para el desarrollo de esta memoria se utilizó la implementación de 2 Pilas de entibación y sus correspondientes 2 Anclajes (Muñoz, 2011). Estas instalaciones implementadas fueron estudiadas y medidas en los meses de Diciembre, Enero, Marzo y Abril.

En este periodo se llevaron a cabo mediciones de comportamiento térmico sin perturbación del suelo y con la perturbación de éste. Cada medición se realizó con el equipo Test de respuesta térmica con la finalidad de entender qué temperaturas se alcanzan en el interior tanto de las Pilas como de los Anclajes durante los meses mencionados, también se estudiaron y definieron los parámetros como la conductividad térmica del medio (Suelo-Hormigón) y la tasa de rechazo de calor del mismo medio.

El último alcance de la memoria apunta a la integración de las metodologías que en la actualidad se ocupan para el diseño de instalaciones geotérmicas de baja entalpía. En esta etapa se han tomado las consideraciones de diseño de la norma alemana VDI 4640 aplicada al diseño de Borehole Heat Exchanger.

La memoria abarca 3 ejes que se definen a continuación:

- 1.-Mejorar Test de respuesta térmica e instalaciones en Terreno
- 2.-Estudio de comportamiento de Pilas y Anclajes energéticos (EP+A) y propuesta de parámetros de diseño
- 3.-Alcance de aplicación de EP+A con datos reales.

La Figura 1 describe las resoluciones tomadas ante las preguntas planteadas inicialmente con respecto a las tareas necesarias para cumplir los objetivos. En este caso cada uno de los ejes representa además las etapas principales en las que se podría dividir el trabajo realizado. Además los recuadros de preguntas planteadas, tareas realizadas y solución al problema o resultado del estudio han sido generadas a partir de una metodología de trabajo que se adoptó desde el comienzo en esta investigación, que fue el CIFE HORSE SHOE (Fischer, 2006) para llevar un control de la investigación y nunca perder el principal objetivo de las preguntas y problemas planteados inicialmente.

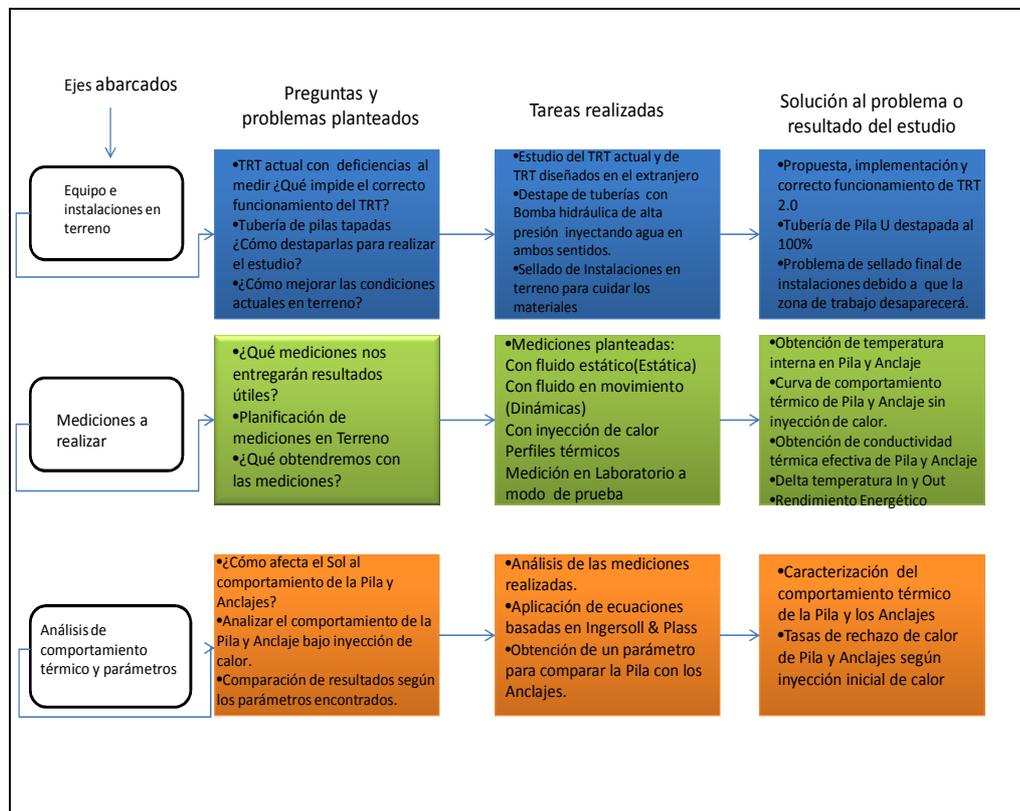


Figura 1. Preguntas planteadas durante la memoria para asignar tareas a cada objetivo.

1.4. Ámbito de Aplicación

El desarrollo de esta memoria cuenta con el estudio de una implementación innovadora en el campo del estudio de soluciones energéticas con la introducción de un sistema de tuberías en Pilas de entibación y sus respectivos Anclajes, aprovechando las excavaciones y procedimientos necesarios para su instalación habitual como parte del proyecto de edificación. Es importante notar que la etapa de excavación muchas veces es la causal de la pérdida de competitividad de estas implementaciones, por lo tanto este ahorro le otorga a este “producto” una mayor competitividad analizando los costos de las otras opciones. El alcance de esta implementación en un futuro cercano puede llegar a ser de gran escala una vez que el aprovechamiento térmico de las instalaciones se dé a conocer con claros fundamentos experimentales, pudiendo lograrse la apertura de un nuevo mercado con participación de una amplia gama de especialidades tanto ingenieriles como técnicas.

1.5. Etapas generales del desarrollo de la memoria

El capítulo 1 muestra algunos de los aporte y centros en que se desarrolla la geotermia en la actualidad. Por otro lado en el desarrollo de la memoria se abarcará desde una explicación física de la zona en que se realizaron las mediciones (capítulo 2), explicando el lugar exacto donde se realizaron éstas, continuando en el capítulo 3 con la descripción y un detallamiento de las instalaciones o elementos de entibación que se utilizaron para la investigación. En el siguiente capítulo se explican los procedimientos realizados para comprender el funcionamiento del TRT y el planteamiento de un rediseño con la implementación realizada al TRT (capítulo 4) con la que finalmente se mejoró su funcionalidad. Los siguientes capítulos abarcarán las mediciones realizadas tanto en terreno como en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad, para luego explicar cómo se analizaron los datos obtenidos con el equipo (capítulos 5 y 6) y como se manejó la información para la obtención de parámetros (Cap.7), para luego continuar la memoria con el estudio de rendimientos térmicos asociados tanto a la Pila como a los Anclajes (capítulo 8). El capítulo 9 está netamente enfocado en el dimensionamiento de las instalaciones geotérmica, abordándolas de distintos puntos de vista, ya sea mediante la norma Alemana VDI 4640 o mediante un dimensionamiento directo en base a los rendimientos. El capítulo 10 hace referencia al estado del arte en el uso de Pilas energéticas o utilización de geotermia de baja entalpía para la climatización y por último cerrando la investigación en el capítulo 11 se abordan las principales conclusiones del trabajo desarrollado.

2. DESCRIPCIÓN DEL TERRENO EXPERIMENTAL.

La información sobre las condiciones que puedan afectar a las Pilas y Anclajes es un factor fundamental a la hora de realizar mediciones en el lugar donde se realizará un experimento de estas características. Es por esto que conocer el suelo en que se está trabajando, las temperaturas máximas y mínimas de la zona y las condiciones de borde del problema será una etapa crucial del trabajo, etapa que se prolongará a lo largo de todas las mediciones que se realicen, ya sea midiendo las temperaturas de los lugares estratégicos, como conocer con precisión en qué medida afecta la exposición parcial de condiciones ambientales a las instalaciones (exposición al sol) y por último analizar si existirán flujos de aguas subterráneas cercano a las Pilas o Anclajes, será parte de la información necesaria para avanzar en el estudio. Para conocer las principales característica del terreno y condiciones ambientales se describe a continuación de forma muy general la ubicación del Proyecto implementado.

2.1. Condiciones en terreno

El proyecto Beauchef 851 durante el periodo de mediciones (Diciembre del 2011, hasta mediados de Abril del 2012) se encontraba en obra gruesa, por esta razón la exposición directa a condiciones ambientales de la Pila de entibación es un factor a considerar en los estudios. El avance de la obra durante la primera ronda de mediciones (Medición estática y dinámica de Diciembre 2011- Enero 2012) mantuvo expuesto un 50 % de las Pilas a la intemperie, para el caso de la segunda ronda de mediciones (Marzo-Abril 2012) el avance de la obra dejaba expuesto un 13% de la Pila implementada. La Figura 2 muestra una imagen de la ubicación de las Pilas en la excavación del proyecto, las Pilas implementadas se ubican bajo la flecha demostrativa.



Figura 2. Ubicación de Pila de Entibación y sus Anclajes en Proyecto Beauchef 851.

2.2. Condiciones Ambientales

En la Figura 3 se observa la variación anual de la temperatura en Santiago, donde se aprecia que en ésta ciudad existirá solo un periodo de demanda térmica de calor y dos periodos con demanda térmica de climatización con frío. Por lo cual Santiago no es el lugar ideal para el aprovechamiento de las condiciones térmicas del suelo debido a las variaciones térmicas anuales. Caso contrario sucede en zonas de Europa donde la temperatura promedio suelen ser siempre bajo la temperatura promedio del suelo, existiendo un aprovechamiento durante una mayor parte del año.

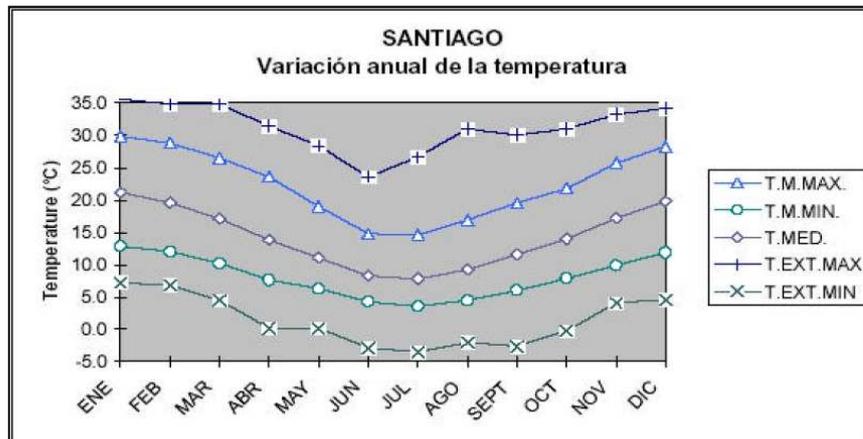


Figura 3. Variación anual de temperatura en Santiago 2011 (DGF U. de Chile).

2.3. Condiciones del Suelo

Es importante saber en qué tipo de suelo se está trabajado, ya que existe información acerca de los posibles valores de conductividad térmica a los que se debería llegar de acuerdo al tipo de suelo en que se realice la implementación geotérmica.

La Figura 4 se obtuvo de un estudio a una calicata sacada del interior del suelo del proyecto Beauchef 851, el estudio fue realizado por una empresa privada especialista en estudios geotécnicos. De acuerdo a la Figura 4 tanto la Pila como los Anclajes estarían embebidos en una grava, por lo que de acuerdo a la norma Alemana VDI 4640 se estaría en un suelo con malas propiedades de extracción o ganancia de calor.

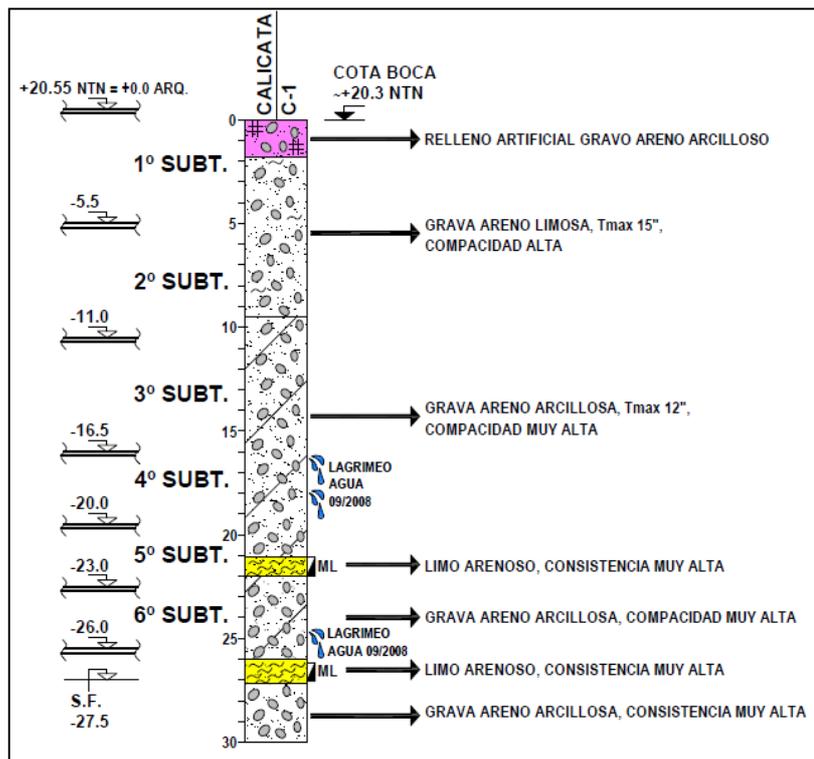


Figura 4. Estratigrafía del suelo del Proyecto Beauchef 851.

Los estudios geotécnicos del proyecto Beauchef 851, muestran la inexistencia de napas subterráneas en el suelo del proyecto, por lo cual se descarta incluir el problema asociado a convección en el estudio del aprovechamiento geotérmico en los sistemas de entibación.

La importancia de conocer las propiedades del suelo en que se está trabajando será un aporte tanto en el comienzo, para hacer una primera estimación del rango de parámetros que esperamos encontrar, como también a largo plazo, ya que una implementación geotérmica podría alterar las propiedades naturales del terreno por lo cual a la hora de realizar una proyección de cuanto se verá afectada la zona alterada será fundamental ingresar en algún modelo computacional los valores más cercanos a la realidad, ya que esta será la única forma de generar modelaciones correctas, tanto físicas como numéricas.

En el caso de esta investigación el tipo de suelo solo ayudará a referenciar el valor de la conductividad térmica de una de las partes de la implementación geotérmica, pero en la actualidad se avanza en el estudio del impacto de la utilización de Pilas energéticas a la resistencia mecánica del elemento de sostenimiento (Laloui et al., 2011) Por lo cual en miras al futuro será crucial haber realizado un excelente trabajo de estudio geotécnico ya que en estas instalaciones solo existe una oportunidad para dejar bajo terreno los elementos que ayudarán con las mediciones y análisis del problema.

3. PILAS Y ANCLAJES ENERGÉTICOS (EP+A)

El método de sostenimiento de suelo utilizado en la excavación del proyecto Beauchef 851 fueron Pilas de entibación de hormigón armado con sus respectivos Anclajes de tensores de acero post tensados rellenos con lechada (3 Anclajes por cada Pila). El funcionamiento de estos elementos que forman parte del proyecto de construcción de Beauchef 851, forman parte de esta innovadora idea que se analiza en esta investigación. La utilización de Pilas y Anclajes como intercambiadores de calor en forma de sondaje es el propósito del estudio. En este capítulo se describirán las características y geometrías utilizadas para la implementación de estos elementos (Muñoz, 2011), analizando y explicando en qué condiciones se encontraban tanto la Pila como los Anclajes estudiados a la fecha de realización de mediciones.

3.1. Instalaciones Implementadas en Beauchef 851

Las instalaciones que se utilizaron en la investigación fueron diseñadas e implementadas en conjunto con Pilotes Terratest en el proyecto Beauchef 851 como parte del primer trabajo desarrollado en esta línea de investigación (Muñoz, 2011). Las instalaciones pertenecientes al sistema de entibación del proyecto Beauchef 851 que fueron implementadas fueron 4, dos Pilas de entibación y sus correspondientes Anclajes (6 ramas). Las Pilas fueron implementadas utilizando dos geometrías distintas; La primera Pila se implementó con una disposición de 6 ramas verticales conectadas, esta lleva el nombre de Pila U, la segunda fue implementada mediante una geometría helicoidal. Los Anclajes fueron implementados de tal forma que los tubos entran y salen de forma inclinada en el suelo, por lo tanto existen 3 entradas por cada Pila que representan los Anclajes. A modo explicativo se observa en la Figura 5 la disposición de una Pila y sus Anclajes.

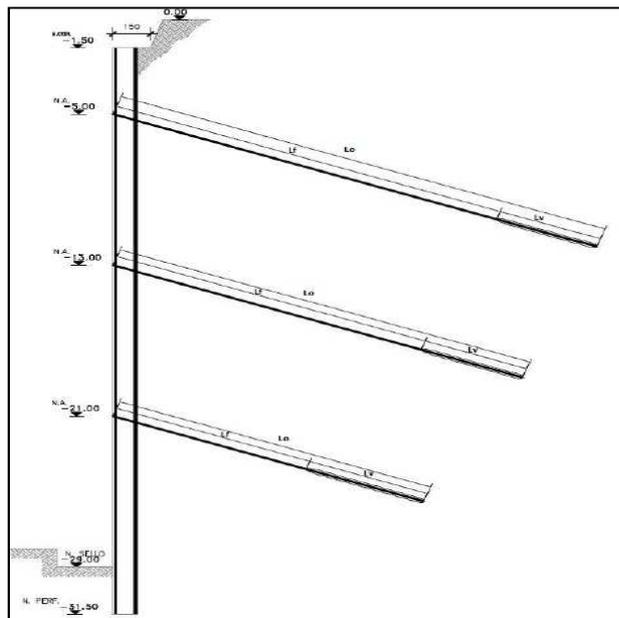


Figura 5. Modelo de Pila de Entibación y sus Anclajes (Pilotes Terratest S.A 2009).

Para finalizar la explicación de la geometría implementada, a continuación se muestra en la Figura 6, los circuitos descritos anteriormente e implementados en el trabajo (Muñoz, 2011).

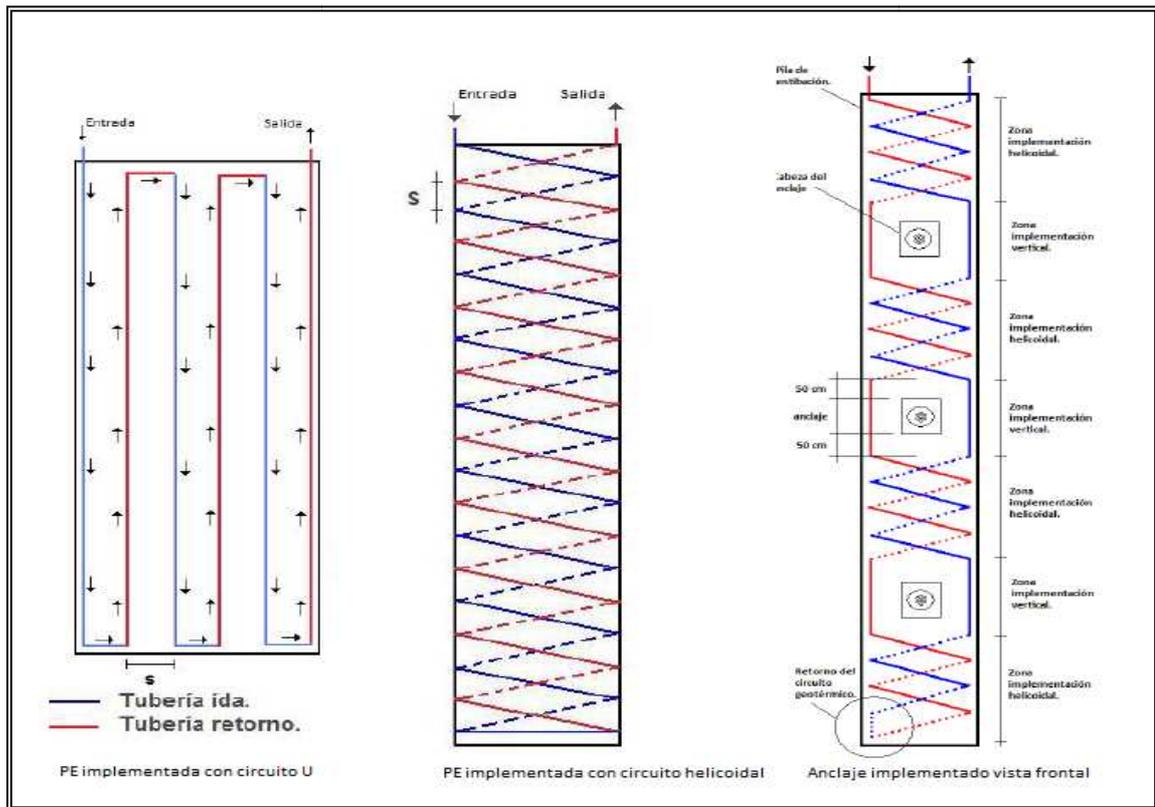


Figura 6. Representación gráfica de las instalaciones en terreno (Muñoz, 2011).

En el caso de las Pilas se tiene 3 ramas de bajada y otras 3 de subida (del fluido circulante), todas estas tuberías (HDP) de diámetro $\phi 32$ mm. Cada rama con un largo promedio de 28 metros, por lo que sin considerar las tuberías que salen de la Pila al TRT en la superficie, se tiene un largo cercano a los 180 metros. Por otro lado y de forma independiente a la Pila se encuentra el Anclaje, implementación compuesta de 3 ramas inclinadas (Figura 5) de los siguientes largos, 17,5 m, 14,5 m y 9,5 m de las cuales la primera se ubica cercana a la cota -5 m, la segunda comienza en la cota -13 m y la última parte en los -21 m de profundidad. Para estas tuberías también se utilizó el material HDP pero con un diámetro de $\phi 22$ mm, con lo que finalmente se obtiene un largo total de 41,5 m (83 m total de tuberías) al interior del subsuelo (sin considerar los tramos de tubería que están expuestas tanto al muro perimetral como a condiciones ambientales). La Figura 6, 9 y 10 representan gráficamente las características descritas recién descritas.

3.2. Descripción del Sistema de Energy Piles y Anclajes

La inclusión de EP+A para el aprovechamiento geotérmico permitirá incrementar su utilización de manera exponencial en la medida que se compruebe su real aporte. Es importante mencionar que la eficiencia energética que se puede lograr ya sea enfriando o calentando espacios servirá tanto para disminuir el gasto energético actual como también servirá como aporte al cuidado del planeta y la sociedad, debido a la baja emisión de gases con efecto invernadero que se logra con esta tecnología, cerca de un 20% de las emisiones de estos gases provienen de la climatización en los edificaciones (PNUMA, 2010)

En este caso es importante notar que una EP+A cumple dos propósitos, servir como sistema de entibación para mantener el suelo en su posición original y a la vez servir como un medio intercambiador de calor o frío, si además se utiliza una bomba de calor adecuada la contribución a la eficiencia energética impactaría los costos de climatización que hoy en día se tienen.

En el caso del proyecto Beauchef 851, a pesar de haber implementado dos Pilas y sus correspondientes Anclajes, sólo se cuenta con una Pila y dos sistemas de Anclajes, esto debido a que la Pila con el circuito helicoidal no ha podido funcionar correctamente.

3.3. Exposición al ambiente de EP+A

El circuito mostrado en la Figura 4 muestra la disposición de las tuberías, la cara expuesta al ambiente de la Pila apunta hacia el norte y de acuerdo a la etapa del proyecto Beauchef 851 y las fechas de las mediciones realizadas contaron con la carga térmica de sol, la programación de mediciones realizadas se observa en la Figura 7

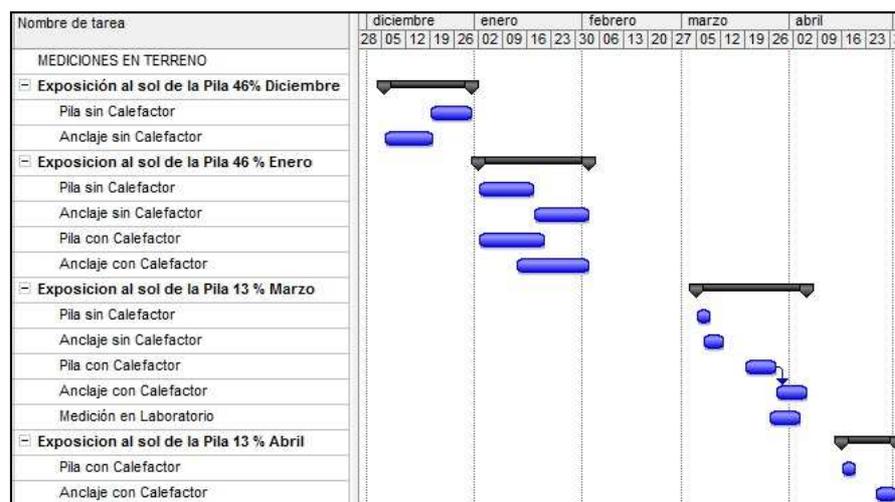


Figura 7. Programa de mediciones en Terreno.

En el caso de los Anclajes se encontraron embebidos en un 100% de su longitud bajo suelo, por otro lado dos de las tres puntas de los tensores de acero estuvieron expuestas a la

superficie durante las mediciones, como también las tuberías de conexión desde las instalaciones al TRT fueron cubiertas con un aislante de color negro opaco por lo cual estos factores se deberían considerar en el análisis de las mediciones a futuro. La Figura 8, muestra un ejemplo de la rama de los tensores de los Anclajes, que queda expuesta a condiciones ambientales durante las mediciones en la Pila U.



Figura 8. Tensores de acero de los Anclajes expuestos a condiciones de exposición ambiental.

La conexión (tuberías) desde el equipo TRT hasta las Pilas y sus Anclajes fueron aislados térmicamente y contra la radiación directa del sol mediante un aislante de 19 mm de Aeroflex y un cobertor de aluminio para reflejar en las zonas expuestas al sol.

Estos factores climáticos que afectaron a las mediciones, dejarán de afectarla una vez que el muro perimetral del proyecto Beauchef 851 alcance la cota 0,0 en la zona de las Pilas implementadas. Para una mayor comprensión de las instalaciones y el funcionamiento de estas se muestra un diagrama con las instalaciones en que se basa el presente trabajo (Figura 9).

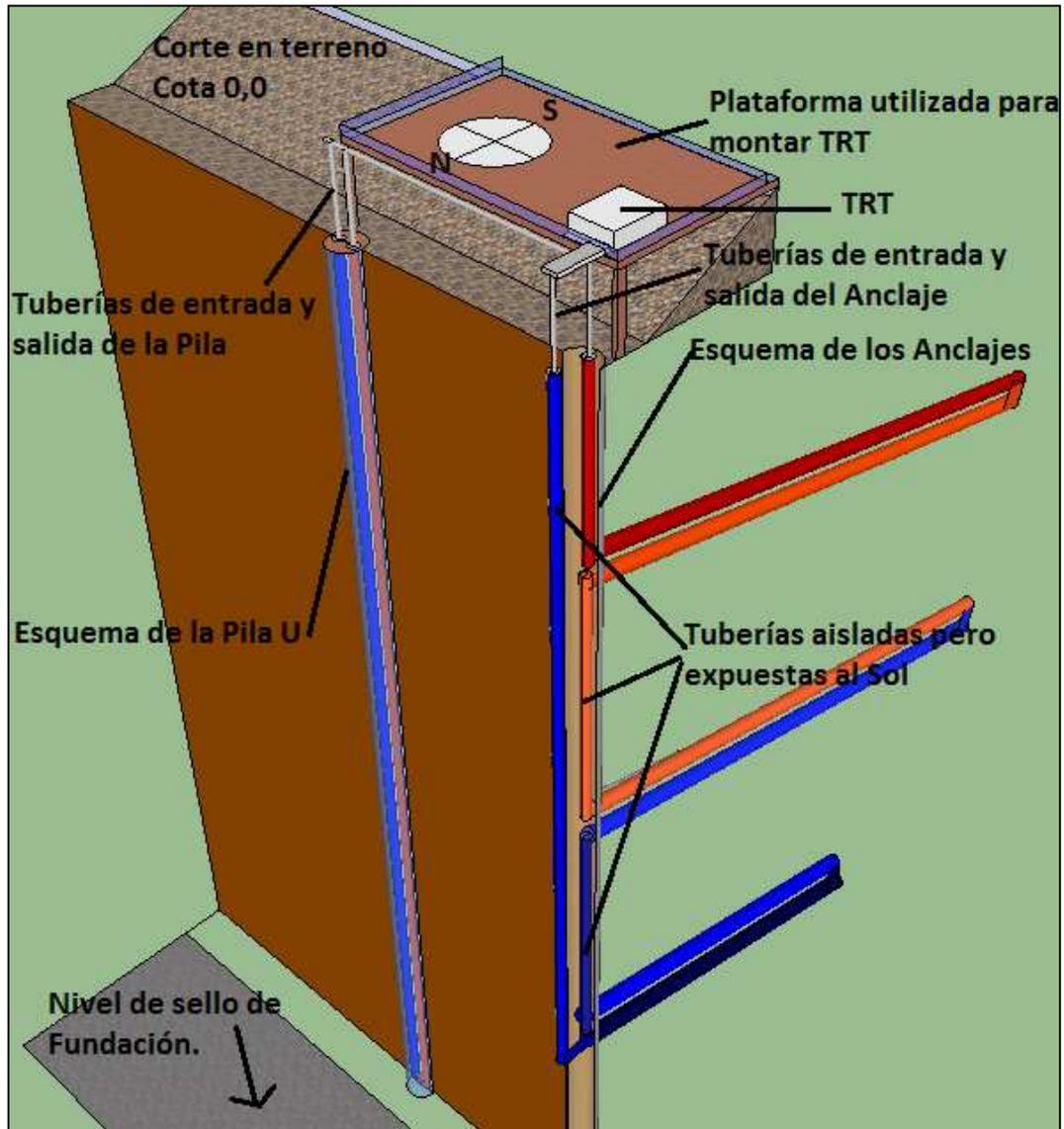


Figura 9. Diagrama de las condiciones de la implementación en terreno.

En la Figura 9 se observan las características de la implementación en terreno, en el caso de la Pila U esquematizada, solo las tuberías de entrada y salida a la Pila quedan expuestas a condiciones ambientales, caso contrario al del Anclaje, ya que todas las tuberías verticales están expuestas a la intemperie durante el periodo constructivo. Una vez terminado el proyecto Beauchef 851 solo los 5 metros superiores de las tuberías estarán expuestos al ambiente, debido a que el muro perimetral del edificio las cubrirá, la Figura 10 muestra lo explicado.

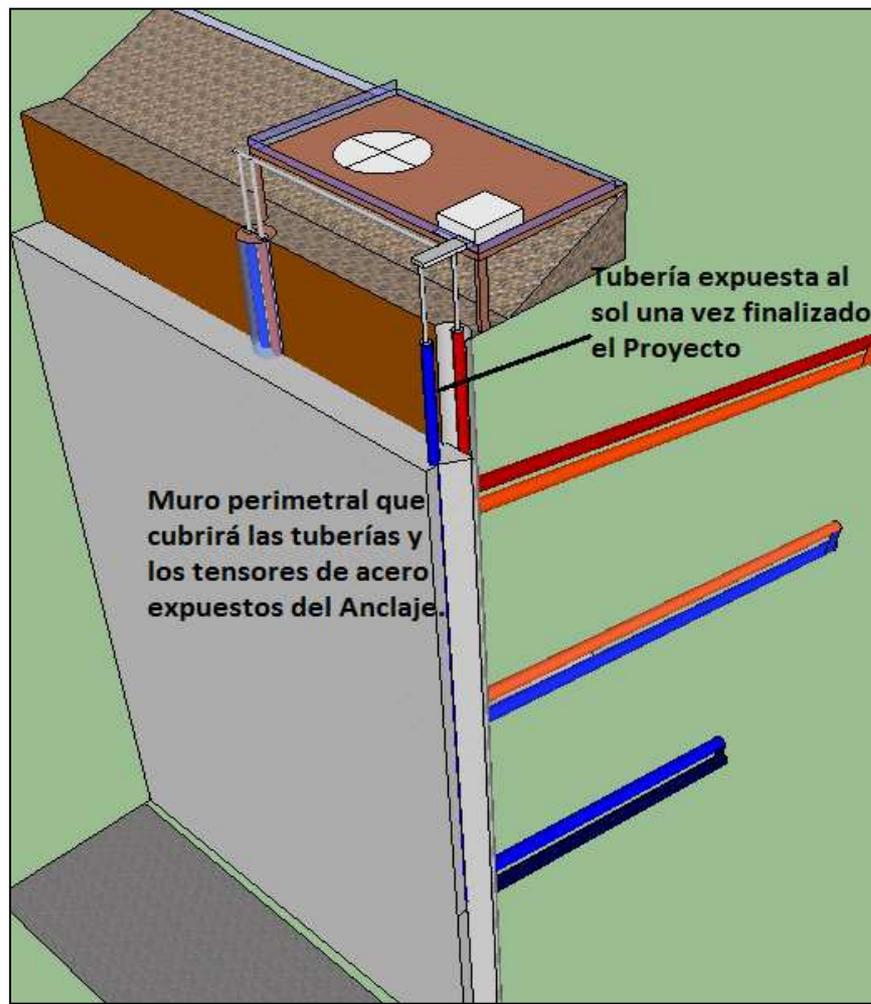


Figura 10. Muro perimetral que cubrirá las tuberías de los Anclajes.

Tanto el programa de actividades como el trabajo en terreno en una investigación de este carácter, están día a día sujeta a condiciones que afectan el calendario original. Las labores en una obra de construcción son dinámicas, y sujetas a soluciones del momento, por lo cual a pesar de haber planificado que los ensayos por realizar en terreno duraran 2 días, siempre terminaron durando más, tanto porque la zona de trabajo era utilizada como cancha de materiales, como por falta de personal de instalación eléctrica que ayudara a la puesta en marcha del equipo. Otro factor a considerar fue el ingreso del equipo a la obra, ya que se necesitó el uso de la grúa pluma para lograrlo.

En resumen se cuenta con una primera instalación que ha sido llamada Pila energética por su ubicación, la cual cuenta con 180 metros de tubería embebida dentro del elemento de entibación por los cuales se hace circular el fluido, tuberías de PEX y de diámetro ϕ 22 mm, la segunda instalación en la Pila (forma helicoidal) no se logró medir por problemas en terreno. Las implementaciones en los Anclajes están conformadas por 3 ramas de distintos largos, que suman 82 metros totales de tuberías, pero que como instalación geotérmica se han considerado solo los metros lineales de profundidad (Pila 30 m y Anclaje 41 m). En ambas implementaciones se utilizó como material de tubería el HDP y los diámetros tanto para las Pilas como para los Anclajes son respectivamente ϕ 32 y ϕ 22 mm.

4. REDISEÑO DEL EQUIPO THERMAL RESPONSE TEST

En la actualidad la utilización de la geotermia pasa por una etapa de desarrollo continuo donde con gran velocidad se desarrollan e implementan proyectos geotérmicos tanto de alta como baja entalpía (Lund, 2010). El principal problema que conlleva la utilización de la geotermia es el alto costo de instalación y la dificultad de realizar un mantenimiento, dado que son instalaciones subterráneas. Es por esto que la búsqueda de un diseño óptimo es el primer paso para evitar errores de dimensionamiento. Para esto se diseñó en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile un Test de Respuesta Térmica (TRT), que con este trabajo ya cuenta con un segundo diseño en el que se consideraron los problemas encontrados en el primer trabajo de esta línea de investigación (Muñoz, 2011) como también mejoras consideradas de acuerdo a una extensa lectura bibliográfica acerca de la evolución de los TRT diseñados en el extranjero (Sanner, 2011). En este capítulo se detallan tanto los componentes utilizados en el desarrollo del TRT como las consideraciones implementadas para mejorar el equipo y su modo de funcionamiento.

4.1. TRT

El método más utilizados para medir los parámetros térmicos del suelo en los últimos diez años ha sido mediante el Test de Respuesta Térmica (TRT) (Seidinger et al., 2000), medición que permite conocer tanto la resistencia térmica (R), como la conductividad térmica (λ) de un estrato promedio del suelo en un lugar particular, también conocidos como parámetros efectivos de un lugar, dado que en la profundidad el suelo puede ir variando sus propiedades y características (Gehlin, 2002).

La utilización del TRT se ha enfocado y utilizado para la obtención de información previa para el desarrollo de un proyecto de implementación de un Borehole Heat Exchanger (BHE), es por esta similitud con los BHE que en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile se ha diseñado una versión del equipo TRT para medir los parámetros térmicos de las instalaciones con que se cuentan (Pilas y Anclajes). La similitud a simple vista entre un BHE y la EP+A es directa, pero a medida que se analiza el caso se encuentran claras diferencias de acuerdo a las condiciones físicas de las instalaciones, superficies sin contacto con suelo, instalaciones inclinadas y materiales distintos al suelo en contacto con las tuberías de transporte del fluido circulante.

La decisión de diseñar y perfeccionar este equipo nace de la necesidad de obtener parámetros de rendimiento de las instalaciones. El diseño de este equipo fue guiado por la amplia experiencia publicada en investigaciones internacionales (Sanner, 2005. Gehlin, 2002)

El primer TRT se diseñó en Suecia (Gehlin, 1996), para continuar con diseños en la Universidad de Oklahoma de Estados Unidos (Austin, 1998) y seguido por un constante desarrollo en Alemania, Turquía, Japón y China.

En la Figura 11 a y b se observa el TRT diseñado para el desarrollo de esta investigación con los resultados del rediseño que se explica en el capítulo 4.

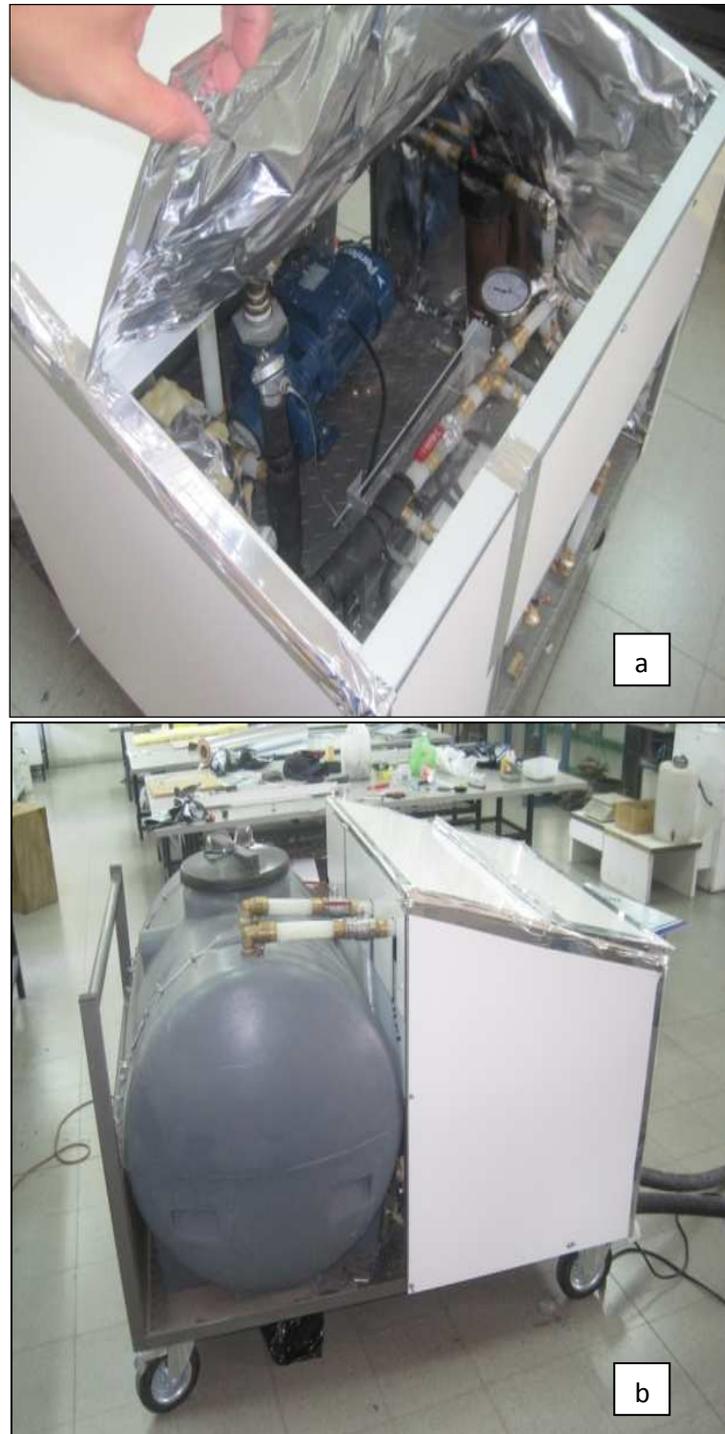


Figura 11. Thermal Response Test Desarrollado en la FCFM, Universidad de Chile. 11a representa la vista interior del equipo mostrando los componentes principales. 11b muestra una vista exterior lateral del equipo TRT en el laboratorio de Sólidos, Medios particulados y Estructuras de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile.

4.2. Diseño del TRT y circuito interno.

El primer diseño del equipo TRT se describe en Muñoz (2011). Con los avances de la investigación geotérmica y con el objetivo de mejorar las condiciones de medición y operación, se replanteó el funcionamiento del equipo de acuerdo a los problemas que se encontraron en las primeras mediciones, la propuesta de rediseño se planteó pensando en tener un equipo con un mayor control de las variables tanto mecánicas como ambientales.

De acuerdo a las recomendaciones del trabajo anterior las mejoras del equipo deberían enfocarse en tener un mayor control del caudal de funcionamiento para no tener problemas con el funcionamiento del calefactor, equipo que bajo un cierto rango de presión de entrada del fluido detiene su funcionamiento apagándose. Este punto fue fundamental en el rediseño del equipo, comenzando por una nueva instalación tanto de los ductos como del orden en que se ubicaban cada uno de los componentes del equipo. Con el asesoramiento de expertos en instalaciones hidráulicas se ubicó cada componente de tal forma que el rendimiento de la bomba pudiera regirse por su curva de funcionamiento (fabricante) pues con esto ya es posible controlar la presión de entrada del líquido al calefactor. Para asegurar el caudal y la presión de entrada se usó respectivamente un rotatómetro para el control del caudal y un manómetro para medir la presión en tiempo real y de esta forma asegurar que el agua circulante esté en el rango de presión que requiere el calefactor (mayor a 20 PSI).

Para realizar una implementación exitosa del equipo se evaluó el diseño, las dimensiones y distancias que se ocuparían en la segunda versión del TRT modelando la geometría el equipo en el programa *SOLID EDGE ST4*. Este modelo representado en la Figura 13 sirvió de guía para realizar el montaje de los componentes una vez aprobado el rediseño por las partes involucradas en el trabajo. El modelo recreado en este programa utilizado en la especialidad de Mecánica servirá de gran ayuda para el lector y dará una imagen clara de la distribución de los componentes en el equipo. La explicación del sentido y las vías de circulación se han esquematizados en la Figura 12 que complementará la información que entrega el modelo de la Figura 13.

El esquema de funcionamiento final del equipo TRT mostrado en la Figura 12 como el modelo computacional de la Figura 13 cuenta con los siguientes componentes ordenados con la siguiente nomenclatura:

- 1.- Estanque PVC 400 L (Estanque Primario)**
- 2.-Des-aireador (Estanque Secundario Acrílico 10 L)**
- 3.-Bomba 2 Hp Monofásica,**
- 4.-Válvula de control general**
- 5.-Filtro Carbón Activado**
- 6.-Manómetro**
- 7.-Rotatómetro**
- 8.-Válvula metálica de Rotatómetro**
- 9/11.- Válvulas circuito sin bypass**
- 10.-Calefactor Trifásico**
- 12.-Válvula Bypass**
- 13.- Sensor puerto USB temperatura (entrada a circuito geotérmico)**
- 14.-Pila o entrada al subsuelo**

15.- Sensor puerto USB temperatura (salida desde el circuito geotérmico)

16.- Válvulas de corte

El esquema de la Figura 12 fue el utilizado en las mediciones en terreno durante el los meses de Diciembre 2011, Enero, Marzo y Abril 2012, en el proyecto Beauchef 851.

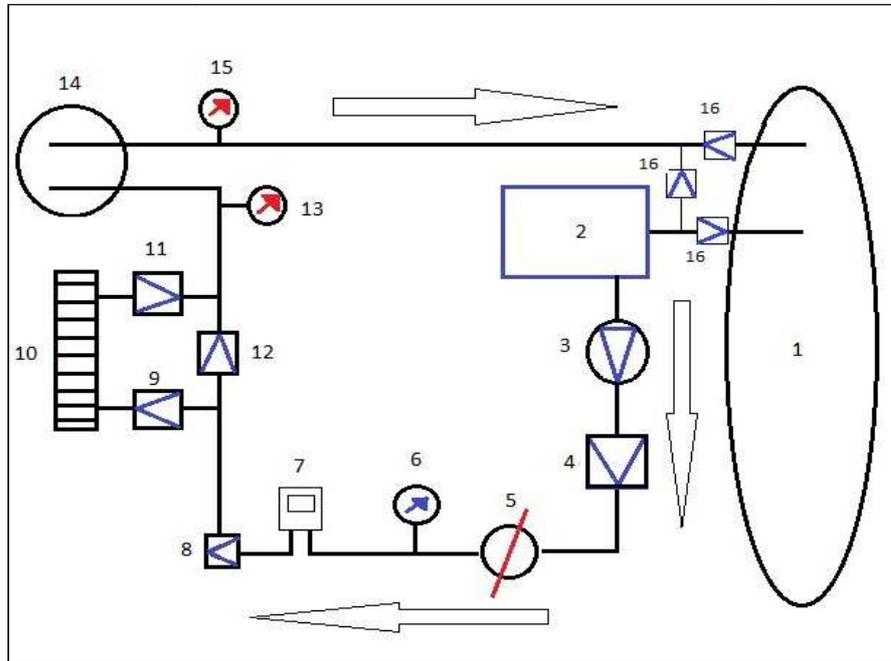


Figura 12. Circuito interno de Thermal Response Test FCFM.

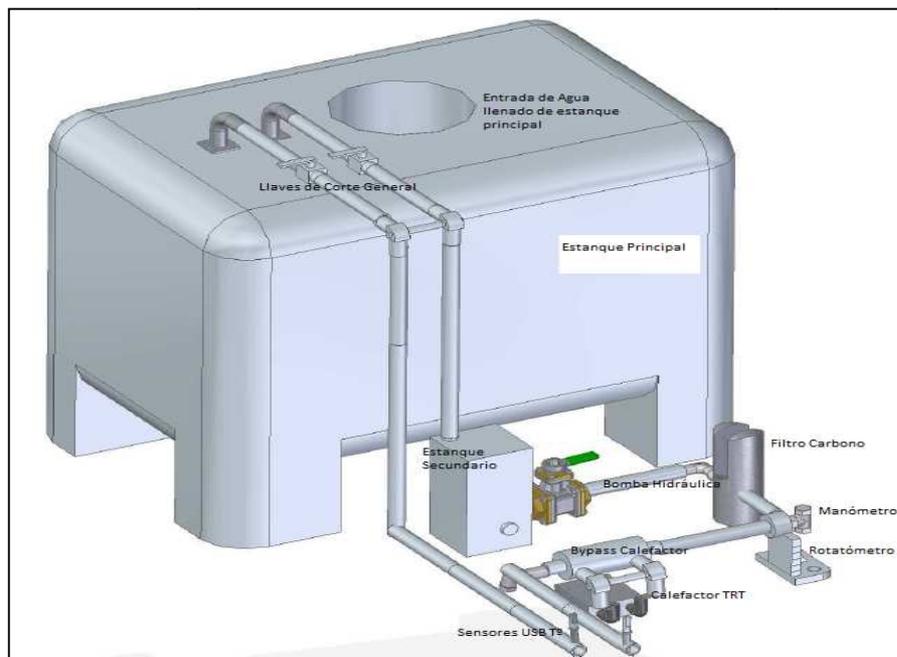


Figura 13. Diagrama del TRT en software Solid Edge ST4.

4.3. Aislación térmica del equipo

Otra variable fundamental a considerar en mediciones experimentales en terreno son las cargas térmicas del ambiente sobre el equipo, tanto frías en la noche, como calientes en el día producto de la temperatura ambiente, condición que se ve amplificada por la alta concentración de hormigones en la faena. Para corregir esta variable o mejor aún “anularla” se ha diseñado un recubrimiento que permita al equipo aislarse del exterior, tanto del frío como del calor. Para esto se han utilizado materiales que permitan delimitar un cierre con características ad-hoc al ambiente en el cual se utiliza el equipo en este trabajo. En primer lugar se buscó y utilizó un material con un índice de reflectancia de 0.97 en su cara exterior y con una transmitancia térmica que calculada mediante las fórmulas de resistencia térmica por componentes alcanza el valor de $6 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$.

Los componentes que cierran el equipo se enumeran a continuación:

1. MelicBond @ Construcción: Compuesto de Aluminio utilizado como placa de revestimiento de muros cortina en edificaciones, con una capa de Fluoro-Carbono. El espesor de la placa fue de 4 mm. Producto perteneciente a Sabc Polymershapes Chile.
2. Estructura metálica de Aluminio.
3. Lana de Vidrio AislaSol de Volcán. Espesor de 50 mm.
4. Envoltura de papel Aluminio de alta resistencia para cierre de aislación térmica.

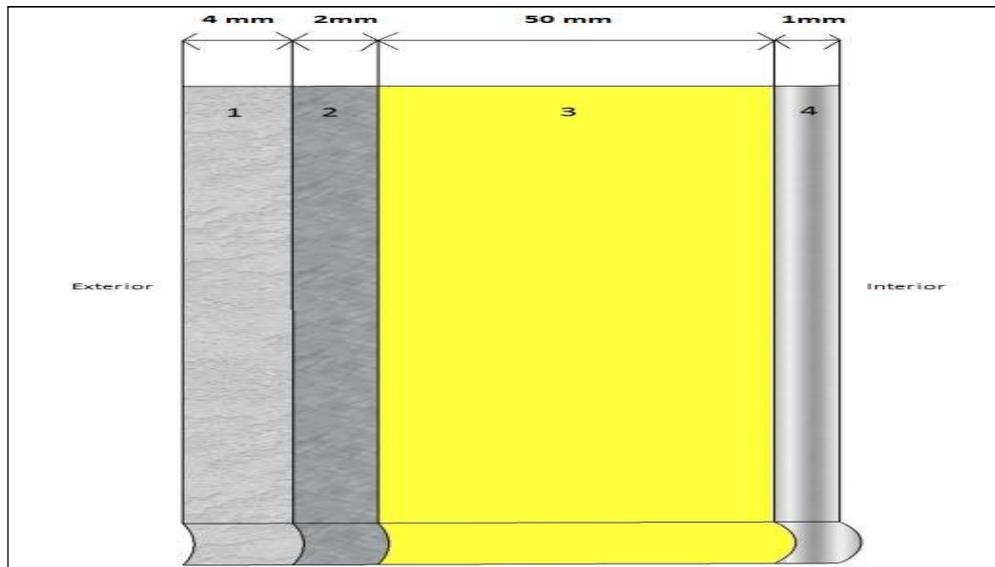


Figura 14. Corte del recubrimiento del equipo TRT.

El diseño del recubrimiento del equipo se realizó con el requisito de poder utilizar el equipo en cualquier región del país (Chile). La transmitancia térmica de los componentes del equipo alcanzada fue de $U=0.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, a continuación se muestra las exigencias según la ordenanza

general de urbanismo y construcción (Tabla 1) donde aparecen los códigos de las zonas Chile desde la 1 a la 7.

Tabla 1. Tramitancia térmica por zona en Chile (CChC, 2011).

ZONA	MUROS	
	U W/m ² K	Rt m ² K/W
1	4,0	0,25
2	3,0	0,33
3	1,9	0,53
4	1,7	0,59
5	1,6	0,63
6	1,1	0,91
7	0,6	1,67

El recubrimiento estudiado se montará sobre una estructura de aluminio diseñada para ser cubierta por las placas por el exterior y por los aislantes térmicos por su interior. En la Figura 15 se muestra la estructura de soporte del cierre del equipo, estructura que va apernada sobre la plataforma de transporte del equipo TRT. La estructura tiene un metro de ancho y un metro y veinte de largo, de alto cuenta con una altura de noventa centímetros y la otra de setenta centímetros.

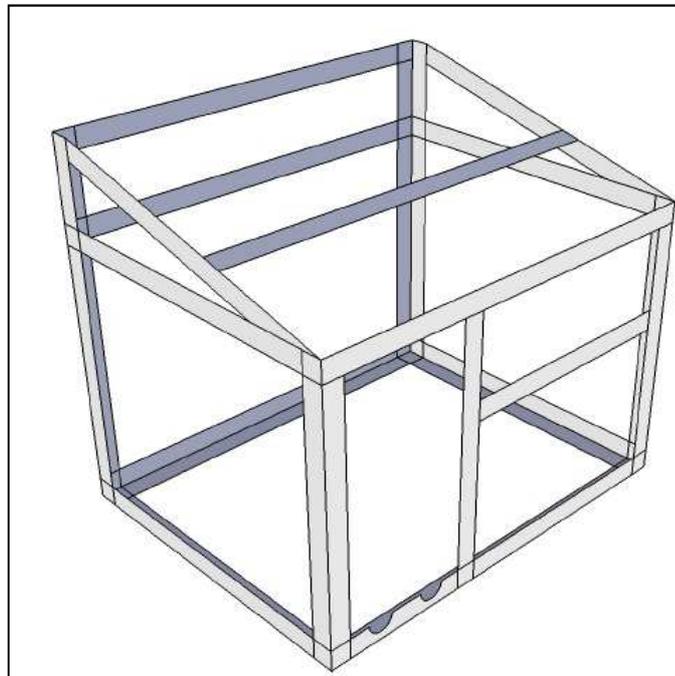


Figura 15. Estructura de Aluminio para el montaje del cierre del equipo TRT.

4.4. Funcionamiento Equipo TRT

El funcionamiento y control del ciclo cerrado del TRT una vez en terreno, comienza con la puesta en marcha de la bomba centrífuga que permitirá llenar de agua los circuitos que se estudiarán. En el caso del circuito de la Pila y los Anclajes, será necesario el llenado de exactamente 127 y 55 litros respectivamente. Para esto el TRT se abastece desde el estanque primario con capacidad de 400 Litros de independencia. Una vez completo el circuito, la conexión al estanque primario es cerrada, para dar comienzo a la medición.

Durante la medición se podrá observar al interior del TRT como la bomba se abastece del agua desde el estanque secundario, el cual cuenta con un Volumen de almacenamiento máximo de 10 Litros. El estanque secundario tiene la función de un *desaireador*, este componente se ha diseñado luego de notar que en las primeras mediciones realizadas con el equipo el funcionamiento del sistema comenzaba a fallar y uno de los problemas observados fue la acumulación de burbujas de aire luego de un periodo de funcionamiento en la entrada de la bomba lo que traía como consecuencia una baja en el caudal de circulación. El estanque secundario acumula las burbujas de aire que se producen por levantar el agua desde los 30 metros de profundidad (fondo de la excavación).

Con la correcta instalación y funcionamiento de la bomba se asegura la entrega del caudal especificado por el fabricante.

El siguiente paso del agua lo hará por el Filtro de carbón activado que permitirá que el agua circulante esté libre de partículas que pudiesen acumularse tanto a lo largo como en los codos de las instalaciones bajo tierra, este filtro también evita dejar pasar los óxidos que vayan liberando con el tiempo las conexiones y materiales utilizados en el TRT. El filtro indujo una pérdida de carga de 60 L/m.

El funcionamiento del TRT dependerá principalmente de tres factores. El primero es el correcto funcionamiento de la bomba y los problemas asociados a levantar el agua desde las instalaciones, el segundo factor es el funcionamiento y rendimiento que se obtiene del calefactor utilizado en el sistema. Para este factor, luego del filtro se ubica el manómetro con el cual se controla la presión de entrada del agua al calefactor. Este control será fundamental para saber si se está en el rango de funcionamiento del calefactor los valores se observan en la Figura 16, el tercer factor será mantener el control del caudal, para esto en el TRT se ha utilizado un Rotatómetro que permitirá controlar el caudal que se genera en el circuito. Este punto es fundamental a la hora de conocer a qué temperatura se está calentando el agua en el calefactor pues su rango de trabajo va de 1 a 7 litros por minuto.

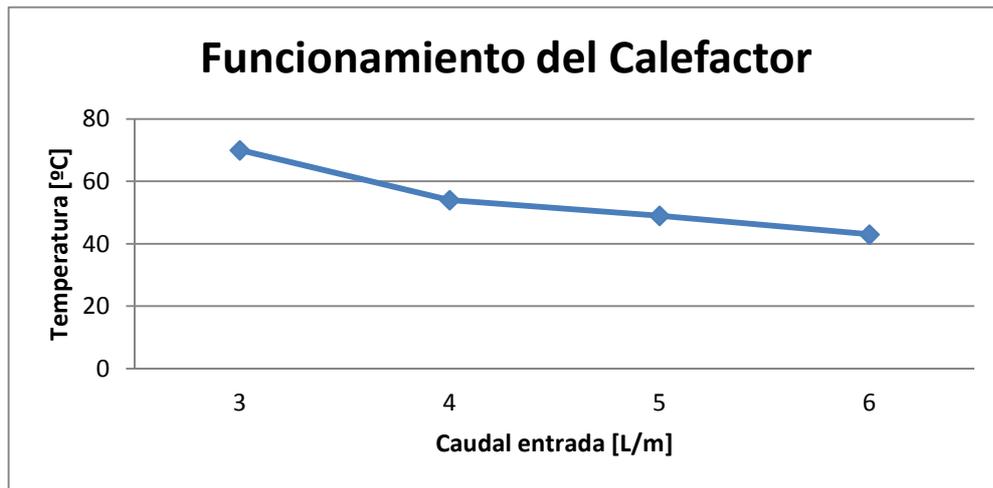


Figura 16. Funcionamiento del Calefactor del TRT.

El circuito del TRT termina con el uso de sensores USB de temperatura, que se observan en la Figura 17, estos registran la variación de temperatura de salida del TRT y otra en la entrada de este, que permitirá generar la curva de temperatura de entrada y de salida que explicará al final como fue la transferencia de calor entre las instalaciones en el subsuelo y el fluido circulante. Las características de funcionamiento de los equipos utilizados se muestran en la Figura 18.



Figura 17. Sensor USB de temperatura – Rotámetro.

Tabla 2. Características de equipos eléctricos del TRT.

Equipos	Característica	Rendimiento máximo	Rango de trabajo	Variable a controlar	Control
Bomba	2 [HP]	900 [L]	0-30 [m]	Caudal	Rotámetro
Calefactor	10000 [watts]	7,5 [L/min]-60 °C	15-150 [PSI]	Presión	Manómetro

En términos prácticos el TRT alcanzó un nivel óptimo de funcionamiento, tanto en la calidad de las mediciones, el manejo de variables como presión instantánea, caudal instantáneo, conservación y medición de temperaturas en todo momento, como también la seguridad del equipo ante posibles robos en terreno.

El equipo TRT rediseñado para la realización de esta investigación permitió determinar con mayor precisión los aspectos que a futuro se deberán mejorar.

Sin lugar a dudas el equipo funcionó correctamente luego de su rediseño e implementación explicados en este capítulo, pero un mayor conocimiento sobre el tema involucra una mayor exigencia en el nuevo funcionamiento alcanzado, por lo cual en esta nueva instancia se han generado nuevas inquietudes con respecto a cuanto más se podría mejorar.

Pero por otro lado se identificó dentro de lo observado que el principal problema no ha sido superado y es la gran potencia de funcionamiento (4.5 kW promedio) con la que cuenta el calefactor, como también su termostato interior que una vez que el fluido llega a los 62.5 °C apaga el calefactor. Este inconveniente juega un rol crucial a la hora de graficar los resultados y aplicar la teoría de Ingersoll & Plass (1948) (Capítulo 5 y 6). En resumen se requerirá cambiar el tipo de calefactor que utiliza el TRT ya sea permitiendo variar la potencia instantánea o disminuyendo la potencia a lo menos a 2 kW en funcionamiento.

En esta instancia de rediseño y pruebas de funcionamiento se demostró que el equipo TRT puede trabajar con un caudal controlado de 5 L/min y a una presión de 20 PSI para poder tener al calefactor en el rango de funcionamiento deseado.

5. TEORÍA DE INGERSOLL & PLASS PARA LA OBTENCION DE LA CONDUVTIVIDAD TÉRMICA DEL SUELO

5.1. Teoría y modelo matemático utilizado

Tener un modelo matemático que sea capaz de describir una curva natural de la respuesta térmica que tenga la EP+A contemplando el tipo de suelo, ciertas condiciones de borde, dimensiones y algunos parámetros geométricos para su utilización como metodología de diseño para diferentes escalas de proyectos es lo que se espera tener una vez concluida esta línea de investigación. En esta segunda serie de mediciones realizadas en este proyecto, que contempla variadas mediciones se espera entre otros alcances comprobar si la utilización de las ecuaciones de fuente de calor lineal de Ingersoll & Plass (1948) aplica al caso. Será importante considerar las condiciones en que el proyecto se está desarrollando.

Importante será considerar si la EP+A siguen con alguna cara expuesta al ambiente (periodo constructivo) pues en ese caso existe una ganancia solar que en la medida que el proyecto alcance la cota 0 en la zona de las Pilas implementadas los resultados debiesen cambiar significativamente. Las ecuaciones que se utilizan en el trabajo se muestran en este capítulo y corresponden al desarrollo matemático de Ingersoll & Plass (1948), el modelo lineal en un medio semi infinito. En este punto es importante destacar las condiciones de borde del problema, ya que de acuerdo a trabajos de Ericsson (1985) que se aprecian en la Figura 18, las estaciones del año tendrían gran influencia hasta los 5 metros de profundidad y luego cero influencia desde los 15 metros hacia abajo.

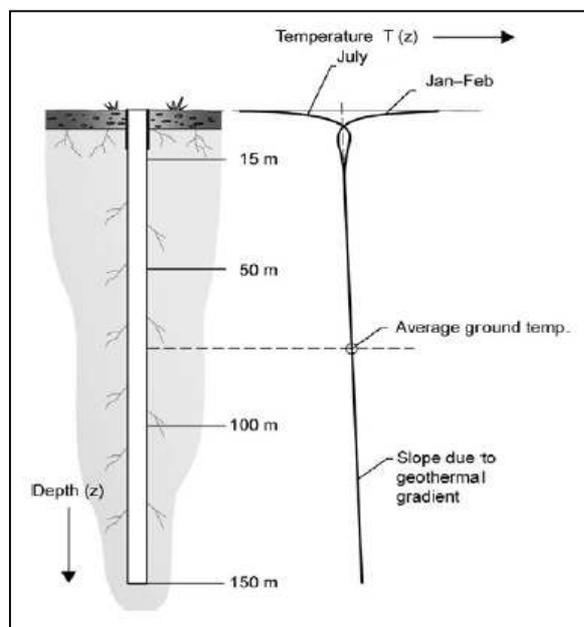


Figura 18. Comportamiento del suelo en profundidad (Ericsson, 1985).

5.2. Teoría de Análisis

Para realizar un estudio de las EP+A existen distintos métodos matemáticos para estimar los resultados de lo que se busque, todos basados en las condiciones reales del problema, tanto geométricas, como de borde e iniciales.

El estudio mediante elementos finitos en este trabajo se ha descartado, pues ha sido abordado por una investigación relacionada (Franco et al, 2012). El modelo que se utilizará para comparar los resultados será el de la fuente lineal (Ingersoll & Plass, 1948), solución analítica al problema de la transferencia de calor en un sistema similar a un BHE en un medio semi-infinito. La utilización de este modelo aplicado tanto a EP+A como a Boreholes implica una serie de simplificaciones con respecto a parámetros geométricos de las instalaciones. El modelo asume que el flujo de calor desde o hacia la EP está siendo representado como una fuente de almacenamiento infinitamente larga inserto en el subsuelo con influencias externas de flujo de calor a lo largo de todo el eje vertical o principal de la fuente. También se asume que el proceso de transferencia de calor se produce de manera radial con respecto al eje más largo de la fuente (EP o Anclaje en nuestro caso). El proceso de la transferencia de flujo de calor entre el fluido circulante y las paredes del “contenedor” son representadas en el modelo como una resistencia térmica que caracteriza la pérdida de temperatura entre el fluido circulante y su pared, que sería en este caso el conjunto tubería más lechada u hormigón respectivamente para el Anclaje o la EP.

Esta teoría ha sido ampliamente utilizada con el propósito de estimar la conductividad térmica en situaciones similares a nuestro campo experimental, pero siempre aplicada a sondajes. Es acá donde se entra en un estado de prueba para corroborar si la teoría puede seguir siendo aplicada a este tipo de instalaciones. La teoría se desarrolló pensando un campo de temperatura que varía en función de la variable temporal t y considerando un radio de estudio r alrededor de una fuente lineal de calor, con la suposición de una inyección constante de calor q muy similar a la inyección de calor que se tiene al utilizar el calefactor en las EP como también en los Anclajes, pero aplicada siempre a BHE, esta representación se muestra a continuación en la Figura 19.

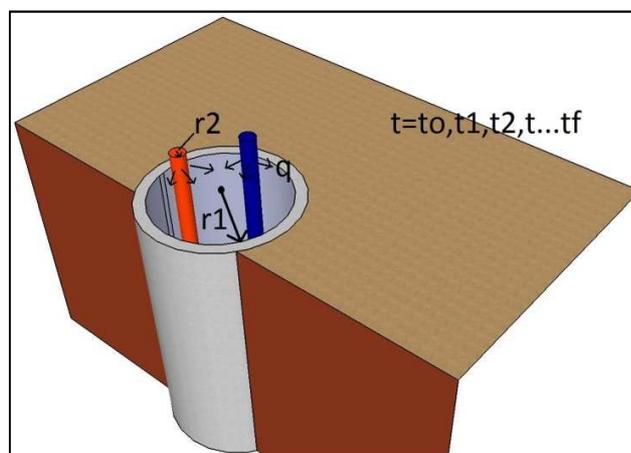


Figura 19. Representación de las variables de Ingersoll & Plass (1948) en la implementación.

5.3. Solución analítica al problema de Ingersoll & Plass (1948)

Ecuación de transferencia de Calor de Ingersoll & Plass (1948).

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r^2}{4at} \right) \quad (1)$$

Dónde:

$T(r, t)$ = Función de temperatura en función de la posición radial y el tiempo.

q [W] = Calor inyectado con el calefactor

r = Radio

t = Tiempo

$\gamma = 0.5772$ (Constante de Euler)

λ [W/mK] = Conductividad térmica del suelo

a [m²/s] = Difusividad térmica del suelo

$$R_{ep} = \frac{\bar{T}_{\text{fluido}} - T_0}{q}$$

R_{ep} = Resistencia Térmica

T_0 [°C] = Temperatura del suelo no perturbada

\bar{T}_{fluido} [°C] = Temperatura media del fluido

q [W] = Calor inyectado con el calefactor

El parámetro E_1 para valores grandes de $\frac{at}{r^2}$ (mayor a 5) puede ser aproximado a la siguiente expresión:

$$E_1 \left(\frac{r^2}{4at} \right) = \ln \left[\frac{4at}{r^2} \right] - \gamma \quad (2)$$

Análisis de error sobre esta ecuación muestran que para $\frac{at}{r^2} > 20$ el máximo error es de un 2.5%, y en el caso que $\frac{at}{r^2} > 5$ el máximo error es de un 10% tanto para radios de Pila como Anclaje. Para medir la temperatura considerando un radio dado y una resistencia térmica (R_{ep}) de la instalación (entre el fluido circulante y la pared o tubería final) la ecuación final de la temperatura del fluido como función del tiempo queda expresada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \left[\frac{4at}{r^2} \right] - \gamma \right) + qR_{ep} + T_0 \quad (4)$$

Ecuación que puede ser reescrita para propósitos de evaluación numérica como la ecuación 5.

$$T_2(t) = C_1 \ln(t) + C_2 \quad (5)$$

En resumen el test de respuesta térmica se basará en un ajuste de la ecuación 5 a la curva de datos generada a partir de los valores obtenidos de la lectura de los sensores térmicos de puerto USB del equipo TRT en terreno, con lo que se obtendrán los parámetros C_1 y C_2 de la ecuación 5. Con estos valores y mediante la generación de rectas y sus respectivas pendientes se obtiene la conductividad térmica de cada instalación (Pila y Anclaje).

Para la correcta evaluación de datos se utilizará la restricción descrita en este capítulo que hace referencia a considerar la curva de respuesta térmica para valores de $\frac{at}{r^2}$ que superen un valor de 20. Esta restricción es la encargada de definir desde qué momento se comienzan a considerar válidos los datos de la medición que se ajusta a la ecuación de Ingersoll & Plass (1948) (límite inferior), por otro lado el límite superior que se consideró en esta misma evaluación numérica fue el primer o segundo descenso de temperatura (apagado de calefactor), elección que en casi la totalidad de las mediciones realizadas en esta investigación solo se utilizó el primer descenso. En los casos que se utilizó el segundo fue debido a que el segundo peak superaba el valor alcanzado en el primero otorgando un nuevo punto de referencia.

A pesar que la ecuación de Ingersoll & Plass (1948) no es aplicable perfectamente a la situación del experimento en cuestión, se ha utilizado por su directa aplicación a la hora de analizar los datos y su alta aprobación en investigaciones similares (Georgiev et al., 2010). Para corroborar la precisión de éstas ecuaciones en este tipo de problema de transferencia de calor se deberán comparar los resultados que se obtengan con una simulación computacional del problema actualmente estudiado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (Franco et al., 2012).

6. MEDICIONES EN TERRENO

La medición en terreno utilizando el equipo TRT tiene como objetivo corroborar y aumentar la precisión de un parámetro de diseño fundamental, la conductividad térmica efectiva (en nuestro caso). Existen tablas generales (VDI 4640) dónde se caracteriza por tipo de suelo un rango de valores esperados de conductividad térmica, pero este caso difiere por su estructura en terreno. En este caso las mediciones entregarán el resultado de todo el sistema (Suelo-Cemento-Tubería), y dado que en este proyecto se cuenta con implementaciones con diferentes geometrías pero embebidas en el mismo suelo, es que se busca conocer con mayor precisión ese primer parámetro de diseño. Las mediciones en terreno, abarcarán tanto mediciones con y sin inyección de calor hacia el suelo (desde el exterior), como mediciones dónde se recirculará el agua de manera constante (a caudal constante), como ensayos donde se estancará el agua, todos y cada uno ha sido planificado y pensado con un objetivo particular, con la finalidad de obtener información que aporte a la investigación. Cada uno de los tipos de mediciones enunciadas se detalla en este capítulo.

El proyecto Beauchef 851 cuenta con la implementación de dos Pilas de entibación y sus respectivos Anclajes, de los cuales hasta la fecha de Abril del 2012 se cuenta con los dos Anclajes y con una de las Pila de entibación en funcionamiento. Las mediciones comenzaron a fines de Diciembre del 2011 una vez instalado el equipo TRT en la obra (Figura 20a). La puesta del equipo TRT en la posición indicada contó con la ayuda de una grúa debido a las dimensiones de la entrada principal a la obra (Figura 20b).

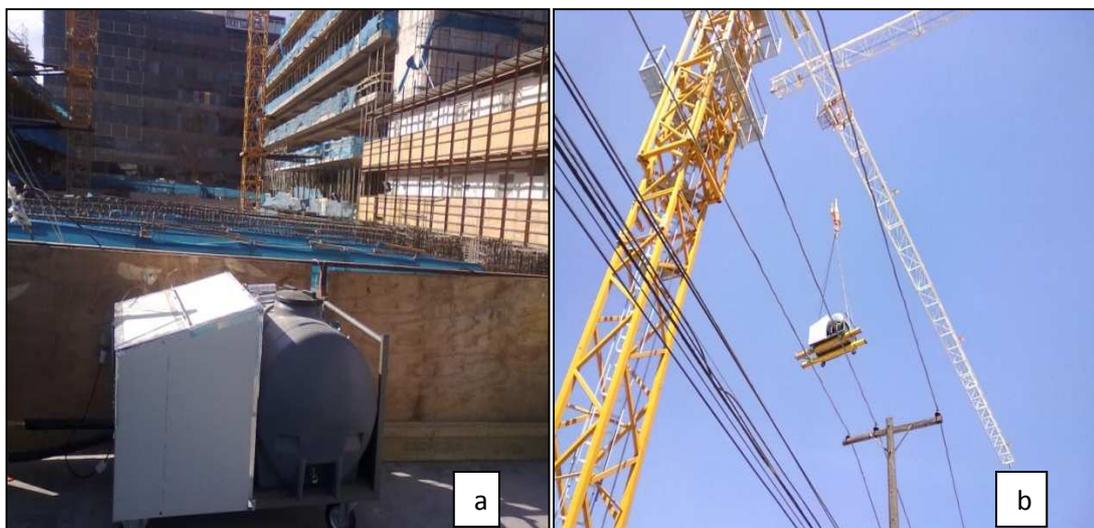


Figura 20. Imagen de TRT en terreno sobre las Pilas. 20a muestra el equipo TRT en la Obra al mes de Diciembre. 20b muestra el momento en que el equipo TRT es transportado por la grúa torre hacia el interior de la Obra.

El orden y tipo de mediciones a realizar para lograr los objetivos planteados es un Pilar fundamental para la obtención de una caracterización de estas instalaciones (Pila y Anclajes), por este motivo y como ya se han explicado las etapas previas de funcionamiento y armado del equipo TRT el memorista cree necesario mostrar un esquema global del trabajo realizado previo a detallar las mediciones que se verán en este capítulo. Por esto se ha desarrollado un

esquema con los principales conductos a seguir para realizar una buena práctica, este procedimiento se ha generado en base a la experiencia en terreno obtenida durante los meses de Diciembre del 2011 hasta Abril del 2012. El procedimiento desarrollado muestra una guía aplicable a cualquier tipo de medición en terreno con el apoyo del equipo Test de Respuesta Térmica (TRT), en este esquema (Figura 21) se han incluido las principales etapas de trabajo y ciertos detalles fundamentales a la hora de realizar una medición con el equipo. Para esto será fundamental que se entienda la importancia de no reutilizar agua que ya fue recirculada en alguna instalación en un periodo de tiempo muy cercano (con alguna inyección de calor hacia los circuitos bajo el suelo), pues en este caso se estaría alterando la respuesta térmica del suelo, que al final tendría un impacto en la curva de respuesta obtenida con los sensores de temperatura, esto es aún más visible al comprender que los tiempos que demora el calefactor en aumentar hasta un cierto valor la temperatura de entrada a las instalaciones varía para una misma instalación con las mismas condiciones iniciales.

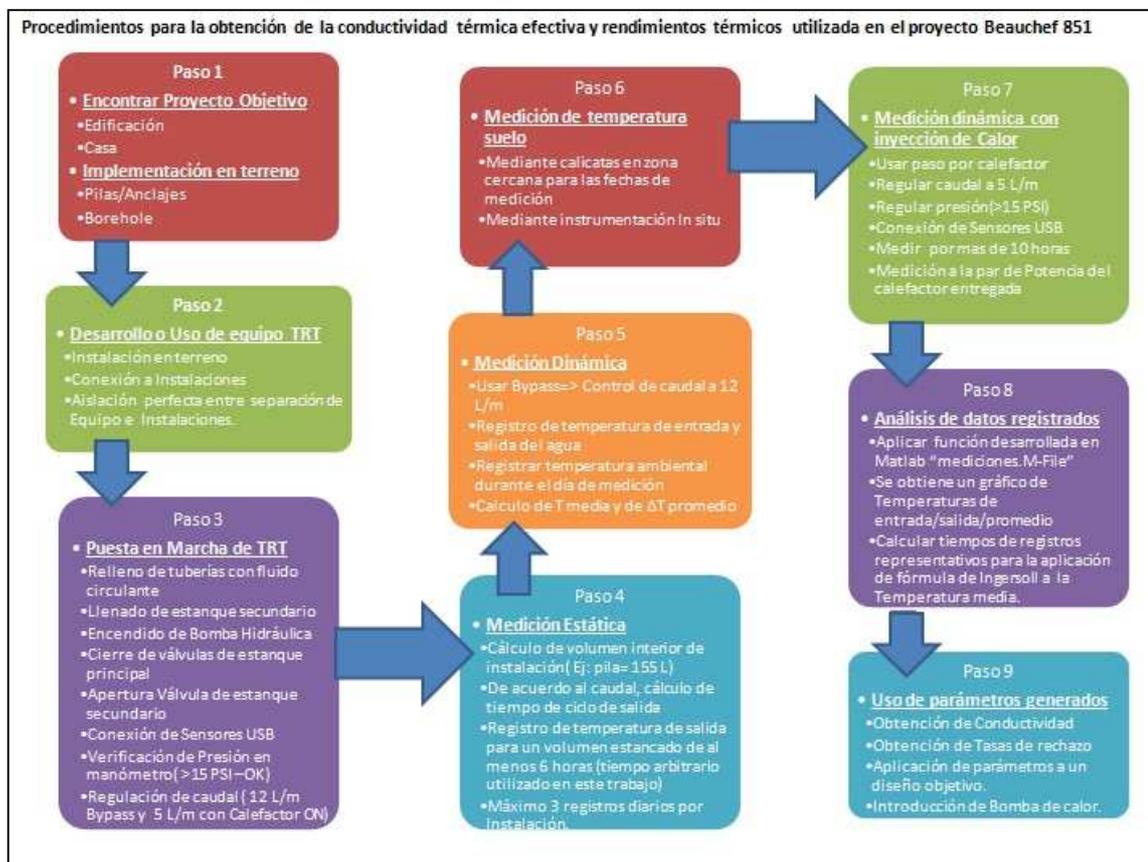


Figura 21. Diagrama de procesos generales.

De acuerdo al esquema anterior se mostrarán en este capítulo las mediciones realizadas tanto en terreno como en el laboratorio, comenzando con la medición de temperatura en el suelo, utilizando una calicata en las cercanías de las instalaciones, para proseguir con las mediciones del TRT en terreno. En este capítulo se ha incluido una medición en el laboratorio con la finalidad de cuantificar el aporte térmico de la bomba hidráulica al fluido circulante.

6.2. Toma de datos de sensores embebidos en calicata

En la Figura 22 se comparan los resultados de las mediciones del perfil térmico hasta los 6 metros de profundidad en una calicata ubicada en las cercanías de las instalaciones. El perfil de Junio 2011 fue obtenido del primer trabajo realizado en terreno (Muñoz, 2011), y el perfil de marzo es el promedio de 3 mediciones de temperatura realizadas durante marzo en la misma calicata ubicada en las cercanías del proyecto.

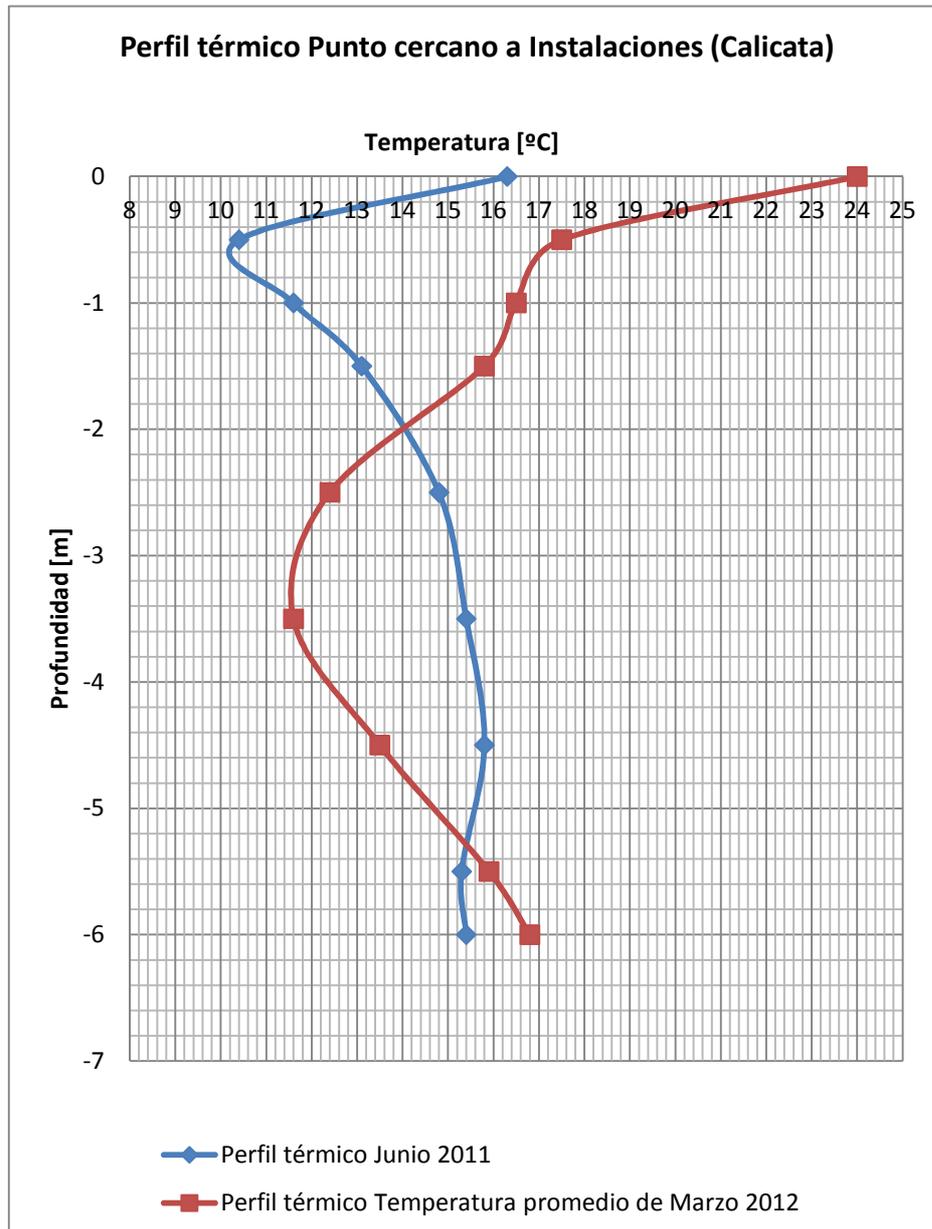


Figura 22. Perfil térmico de calicata en las cercanías de la Pila y Anclajes.

6.3. Mediciones de aporte de calor de la Bomba hidráulica

Para obtener el aporte térmico de la bomba hidráulica al fluido circulante se realizó un ensayo de laboratorio con el equipo TRT. Para eso se utilizaron las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Escuela de Ingeniería).

La elección del laboratorio de Hidráulica fue debido a la necesidad de contar con un medio “infinito” con condiciones controladas, para eso se utilizó la piscina de pruebas del laboratorio de dimensiones 3m x 12m de base y 1,5 m de altura llena de agua a una temperatura constante de 24° Celsius. En este caso se simuló un Borehole, introduciendo a la piscina un circuito cerrado de tuberías de 25 metros por donde circulaba el agua del TRT. La temperatura del agua al interior de la tubería como la del TRT se controló para que comenzara en las mismas condiciones que la temperatura del medio (piscina), 24 ° Celsius. Al no existir ninguna transferencia de calor (Temperatura agua circulante igual a la temperatura del medio), se puede asociar directamente cualquier incremento de la temperatura circulante al calor entregado por la bomba hidráulica del TRT.

En la Figura 23 se muestra la instalación utilizada, mientras que las mediciones realizadas se ven en la Figura 24.



Figura 23. TRT midiendo el aporte de la bomba hidráulica en laboratorio de Hidráulica FCFM.

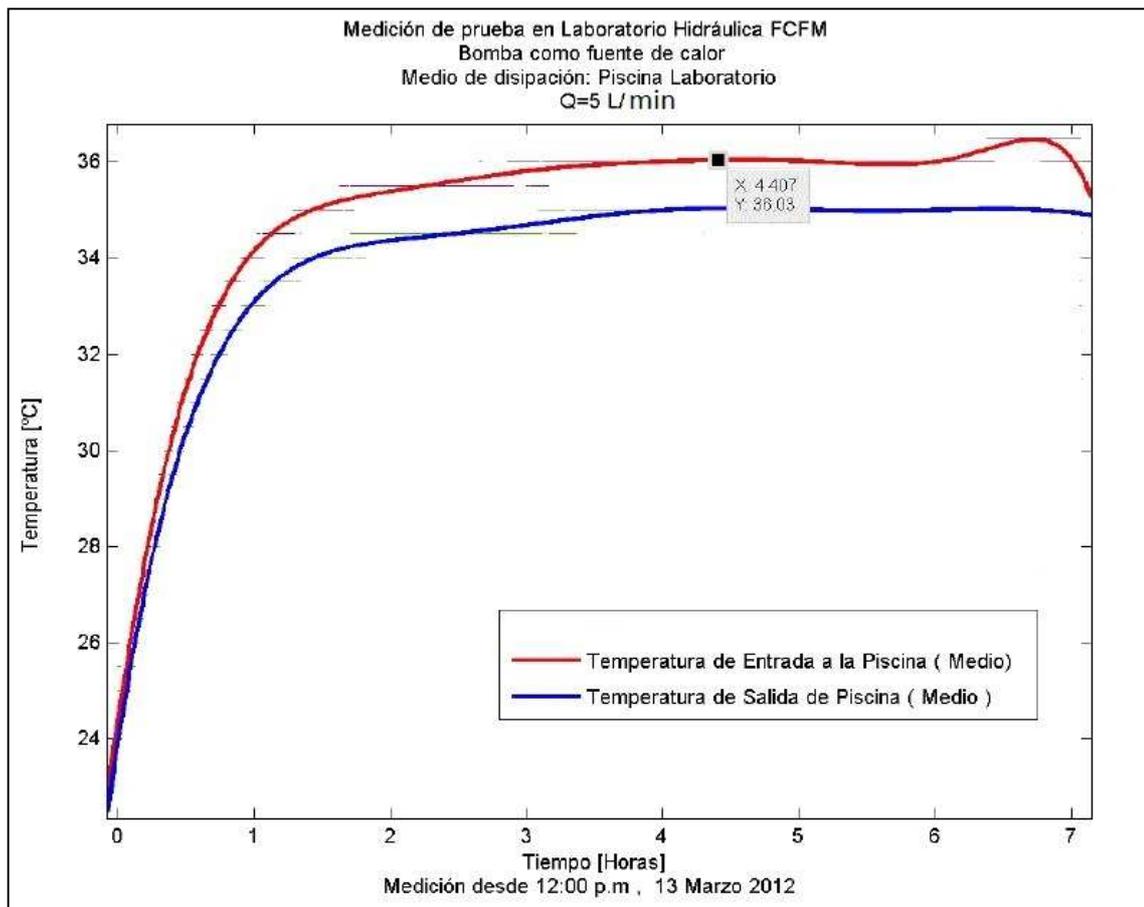


Figura 24. Medición del aporte de calor con Bomba Hidráulica en Laboratorio de Hidráulica.

Considerando el incremento de temperatura de la zona que se podría considerar lineal o hasta 0.5 horas y con los siguientes parámetros el valor de la potencia que la bomba entrega como calor se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores en medición.

Variables	Valores
T Agua [°C]	24
T medio [°C]	24
Volumen [L]	11,5
Caudal [L/min]	5

A continuación se muestra el cálculo del calor entregado durante el incremento lineal.

$$Q = C_e M \Delta T = 1 \frac{\text{Cal}}{^{\circ}\text{C g}} * 11500 \text{ g} * (31.5 - 24)^{\circ}\text{C} = 358800 [\text{Ws}]$$

Q [Ws]= Calor generado

C [Cal/C/gr]=Calor específico del elemento

M [gr]=Masa

ΔT [°C]= Variación de temperatura

Como el incremento lineal duró 0.5 horas, la fracción de la potencia de la bomba que se encarga de calentar el agua es de 199.33 W (9.8 % de la Potencia total de la bomba).

6.4. Mediciones con suelo no perturbado

La primera ronda de mediciones se realizó con el calefactor del equipo TRT apagado ($Q=0$), con esto se logra comprender qué pasa en el estado “natural” tanto de las PE como de sus Anclajes. En esta etapa se realizaron dos tipos de mediciones, que han sido llamadas respectivamente dinámicas y estáticas.

A continuación se explica cómo se realizaron las mediciones.

6.4.1 Mediciones Dinámicas

El objetivo de la medición Dinámica (fluido en movimiento) es obtener una curva representativa de la temperatura al interior de las EP+A a lo largo de un día completo. Con esto es posible observar la influencia de la temperatura exterior sobre Pilas y Anclajes. Además con esto se puede tener una primera comprensión de qué temperaturas se tiene al interior de las instalaciones.

Para realizar esta medición se llenan de agua las tuberías de la Pila como la de sus Anclajes con la ayuda de la bomba del TRT, una vez que se haya logrado esto, solo se deja funcional un circuito, primero la Pila y luego solo el Anclaje (el orden no tiene influencia). Con el calefactor apagado, se da comienzo a la lectura de datos de temperatura tanto de entrada como salida de cada instalación durante todo un día y noche. El agua circulante a pesar de no estar pasando por el calefactor del TRT si se ve influenciada por el calor generado por la bomba hidráulica. A continuación se muestran los resultados obtenidos separados para la Pila y sus Anclajes. La Figura 25 muestra además la variación de temperatura ambiente durante el periodo de mediciones.

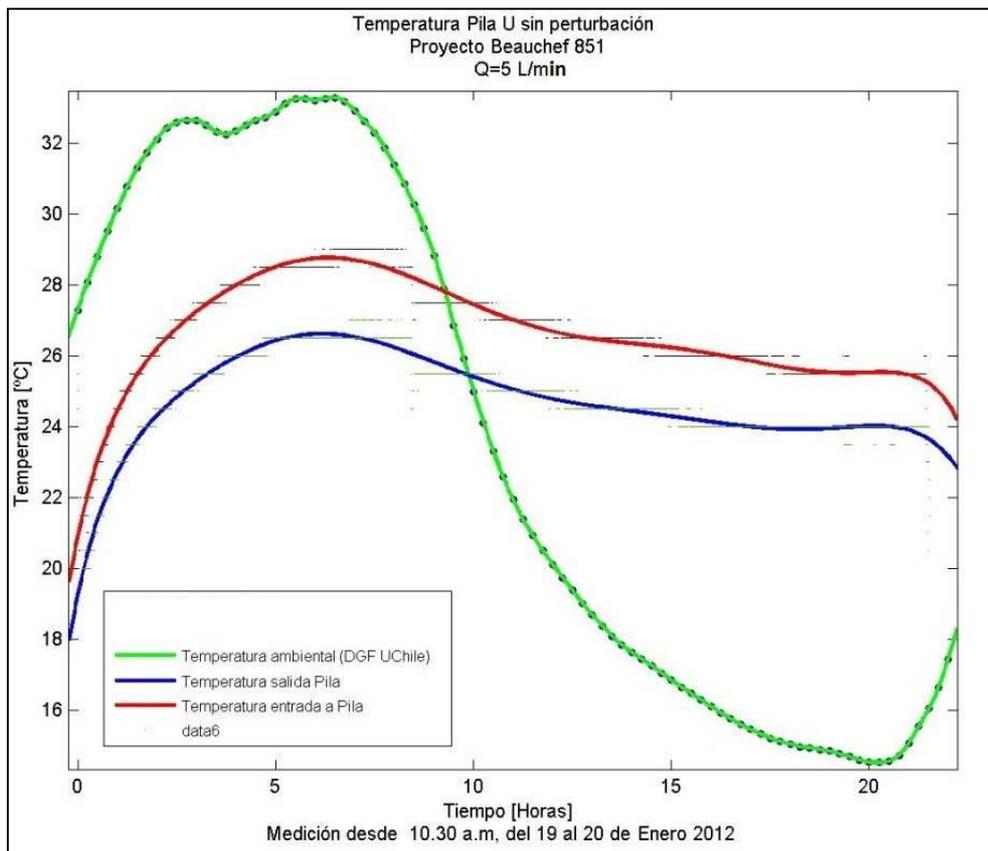


Figura 25. Representación gráfica del comportamiento térmico de la Pila triple U a la fecha 19/01/12.

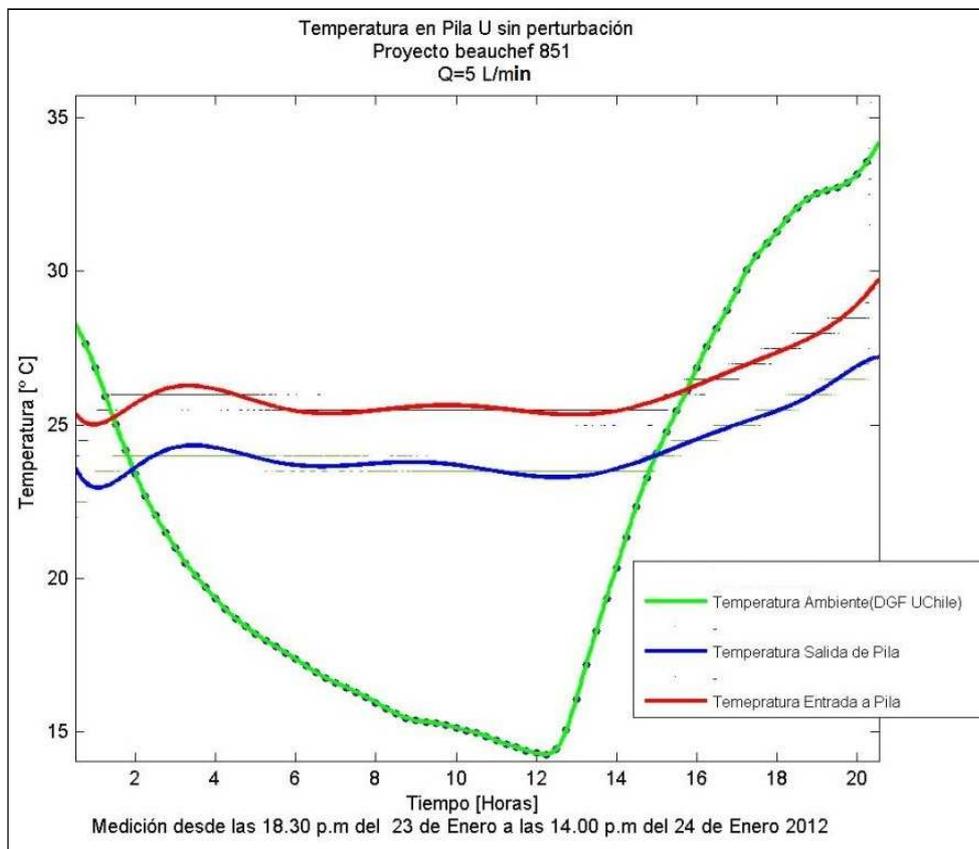


Figura 26. Representación gráfica del comportamiento térmico de la Pila triple U a la fecha 23/01/12.

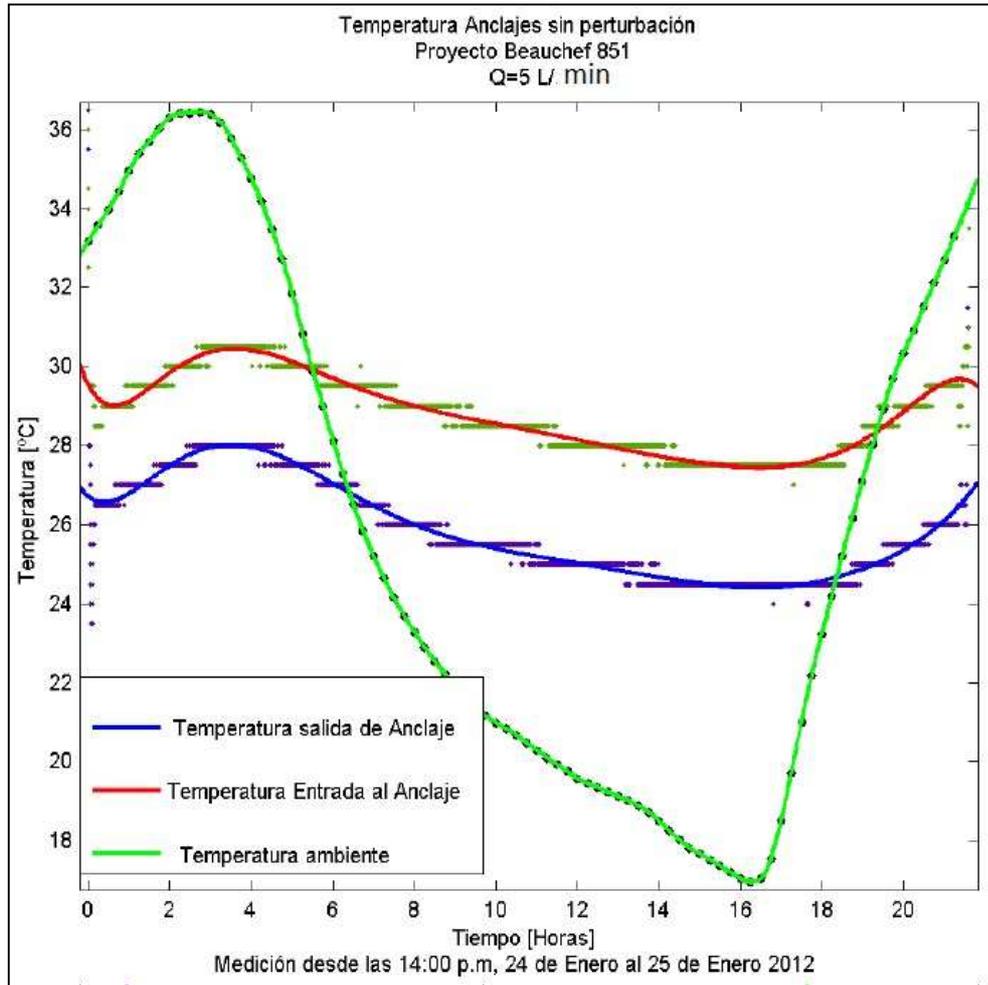


Figura 27. Representación gráfica del comportamiento térmico del Anclaje a la fecha 24/01/12.

6.4.2 Mediciones Estáticas

Para estas mediciones se almacenó el agua durante 6 horas al interior de ambos sistemas (Pila y Anclaje), para luego sacar el volumen almacenado durante el tiempo en que se demore un ciclo. Conociendo el tiempo necesario para evacuar todo el líquido de un ciclo (ciclo de salida Pila, 20 min a 7 L/min y 7 min en Anclaje a 7 L/m) se registra la temperatura de salida del agua, el resultado esperado es una curva con poca variación en la temperatura registrada, esa temperatura representa la temperatura promedio en que se encuentra la Pila o Anclaje a una cierta hora del día. Las horas en que se realizaron las mediciones fueron elegidas de modo de obtener 2 mediciones diarias por instalación, eligiendo dos días consecutivos de similar temperatura ambiente, se toman en total 4 datos por “día ejemplar”. Las Figura 28 a la 35 muestran los resultados obtenidos por cada par de días de medición, tanto para la Pila como para los Anclajes respectivamente.

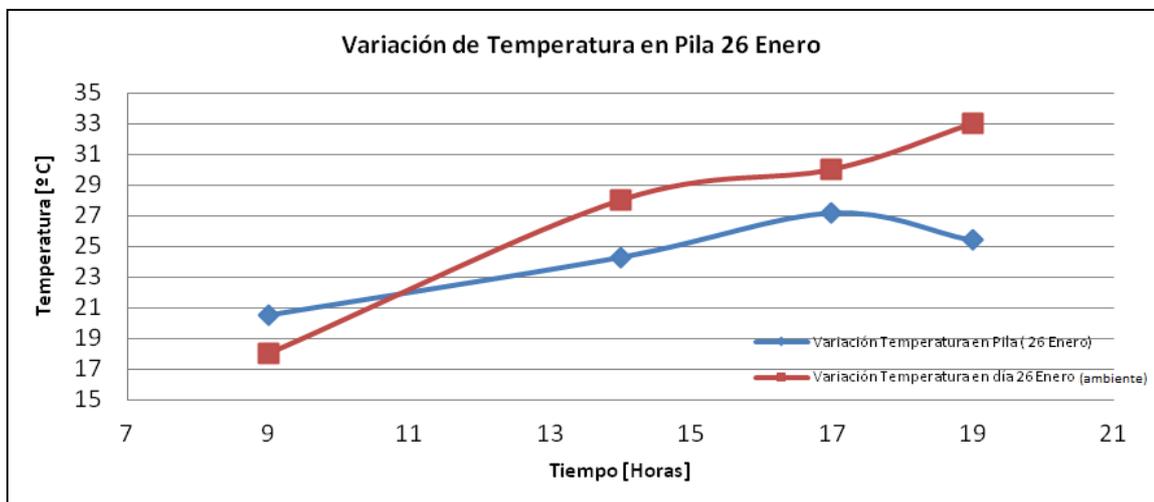


Figura 28. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación a la fecha 26/01/12.

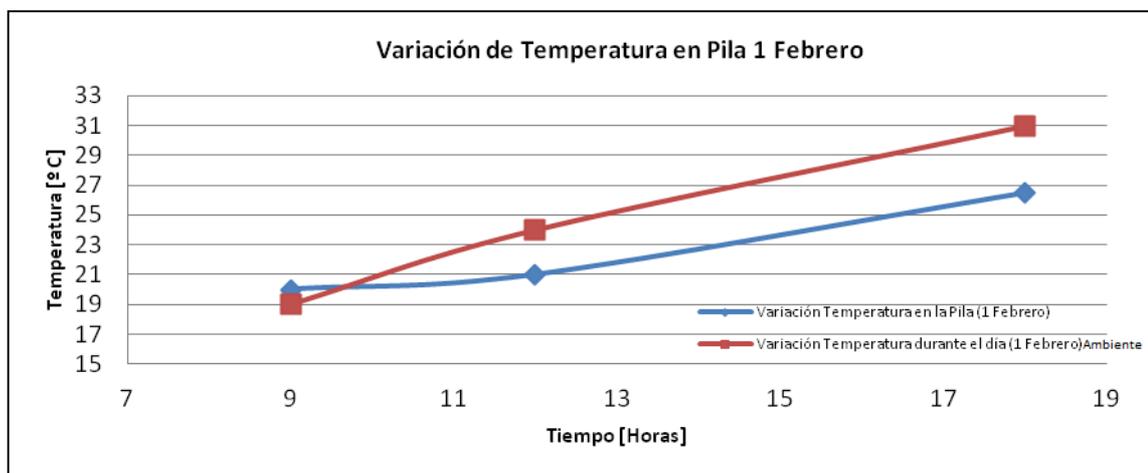


Figura 29. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación a la fecha 1/02/12.

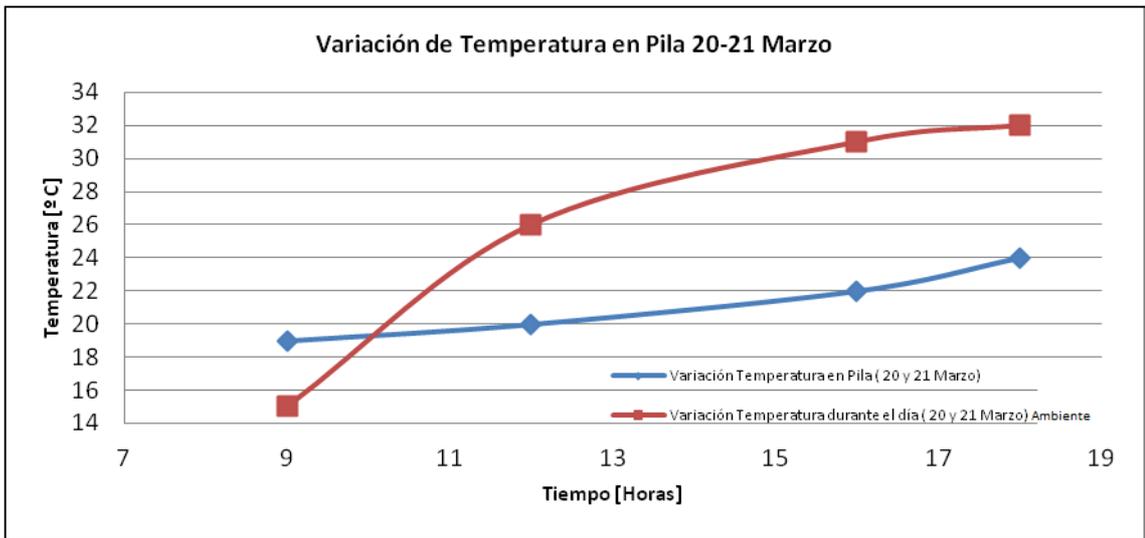


Figura 30. Influencia Temperatura ambiente en las Pilas de entibación a las fechas 20/03/12- 21/03/12.

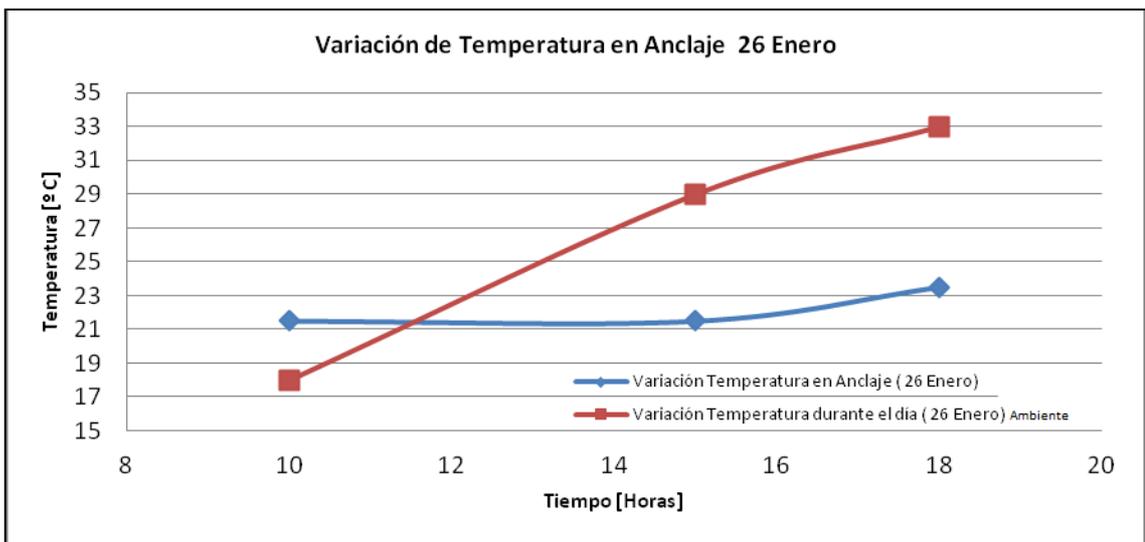


Figura 31 . Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes a la fecha 26/01/12.

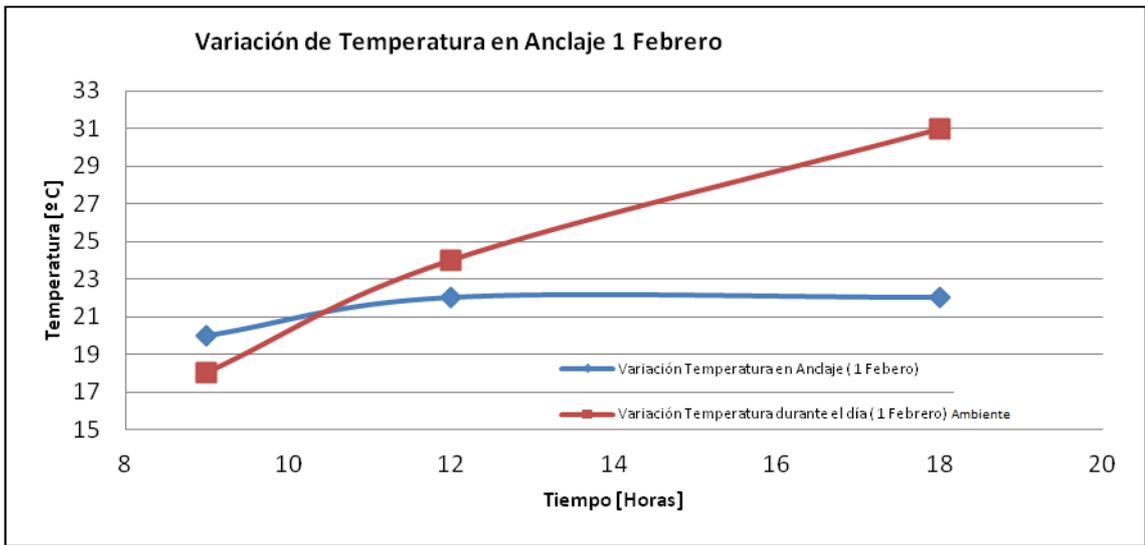


Figura 32. Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes a la fecha 01/02/12.

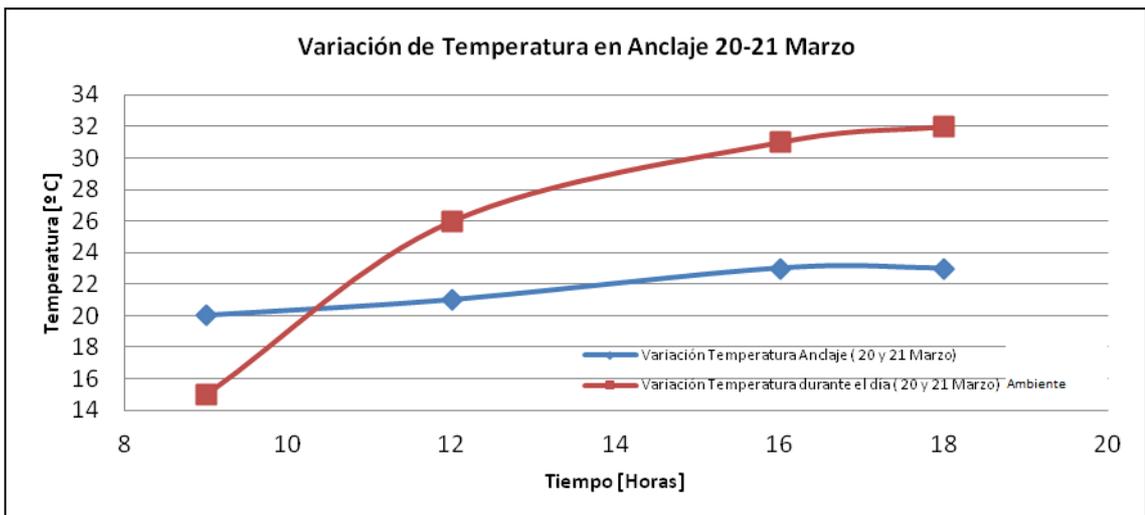


Figura 33. Influencia Temperatura ambiente en los Anclajes a las fechas 20/03/12-21/03/12.

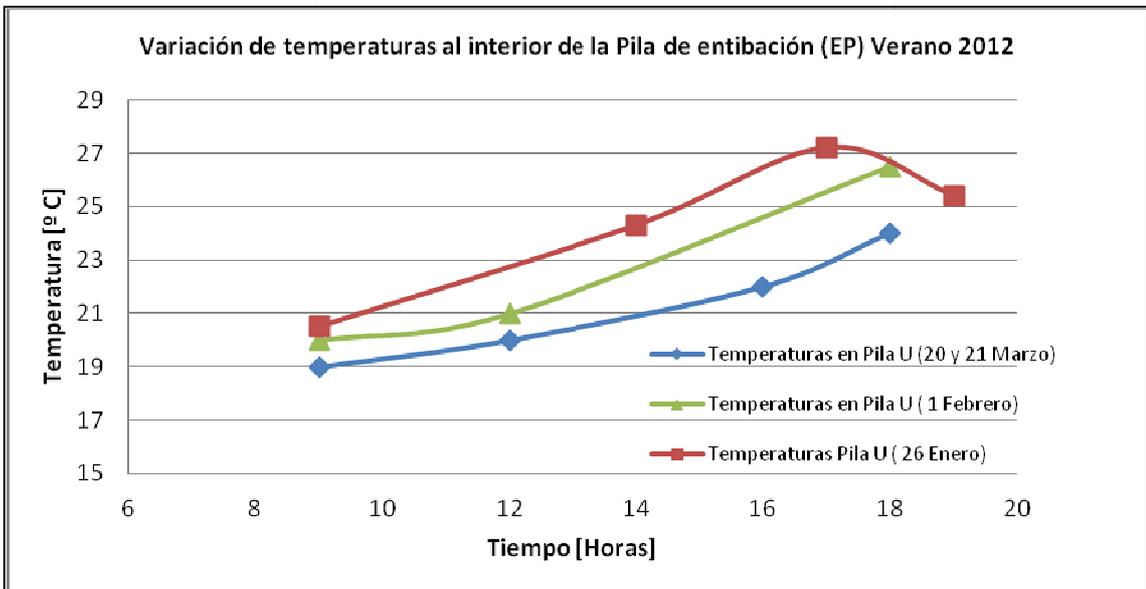


Figura 34. Resumen de datos obtenidos para Pila de Entibación (Pila Energética).

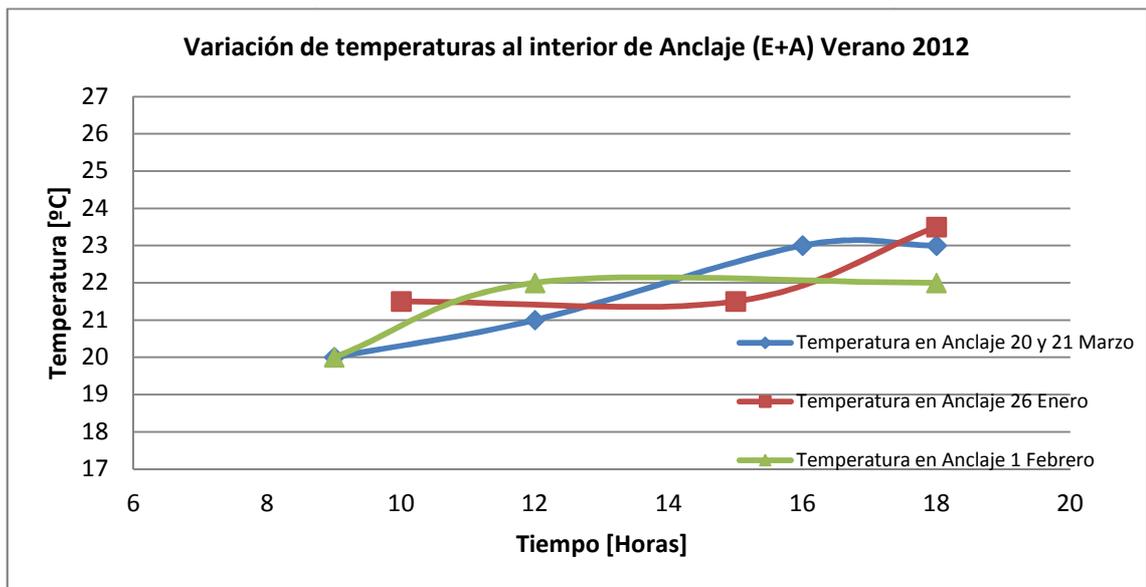


Figura 35. Resumen de datos obtenidos para los Anclajes.

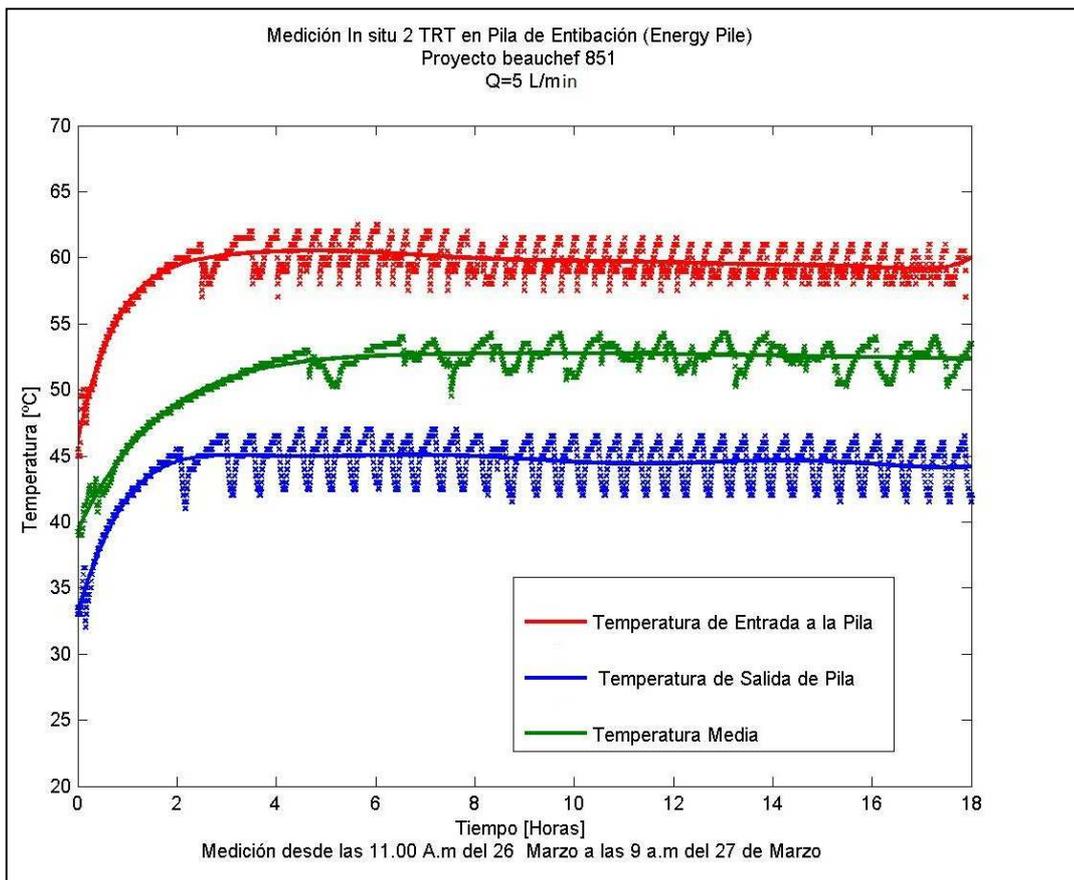


Figura 37. Medición in situ TRT en Pila triple-U a la fecha 26/03/12.

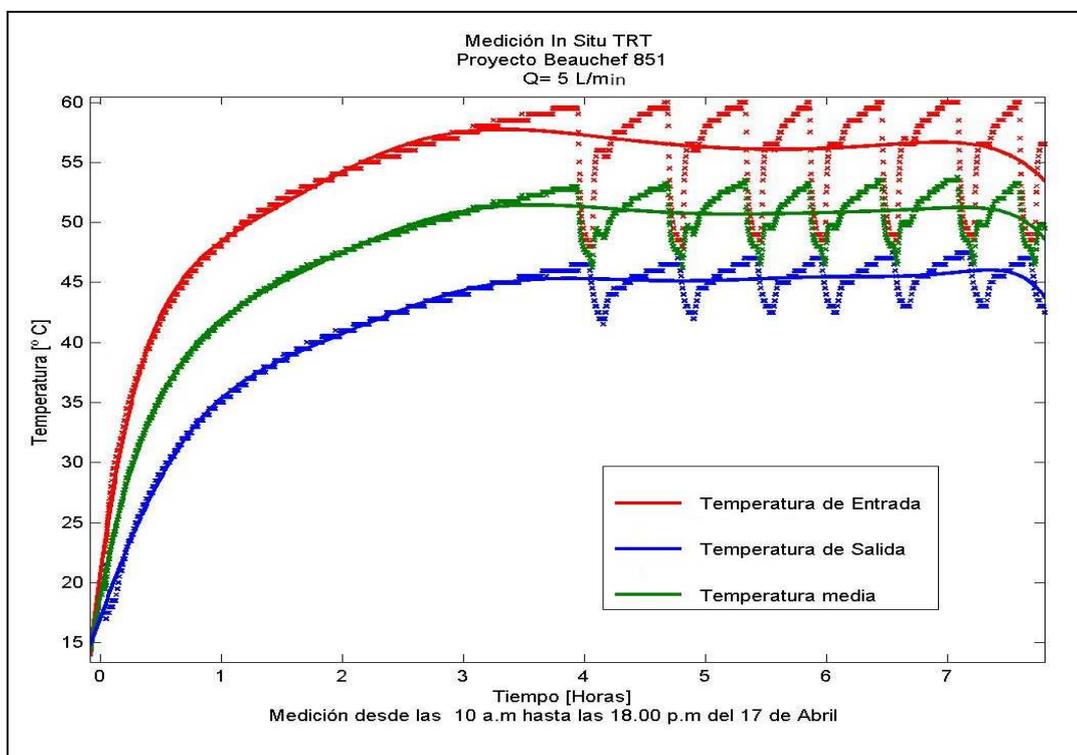


Figura 38. Medición in situ TRT en Pila triple-U a la fecha 17/04/12.

Anclajes Energéticos (Anclaje 1)

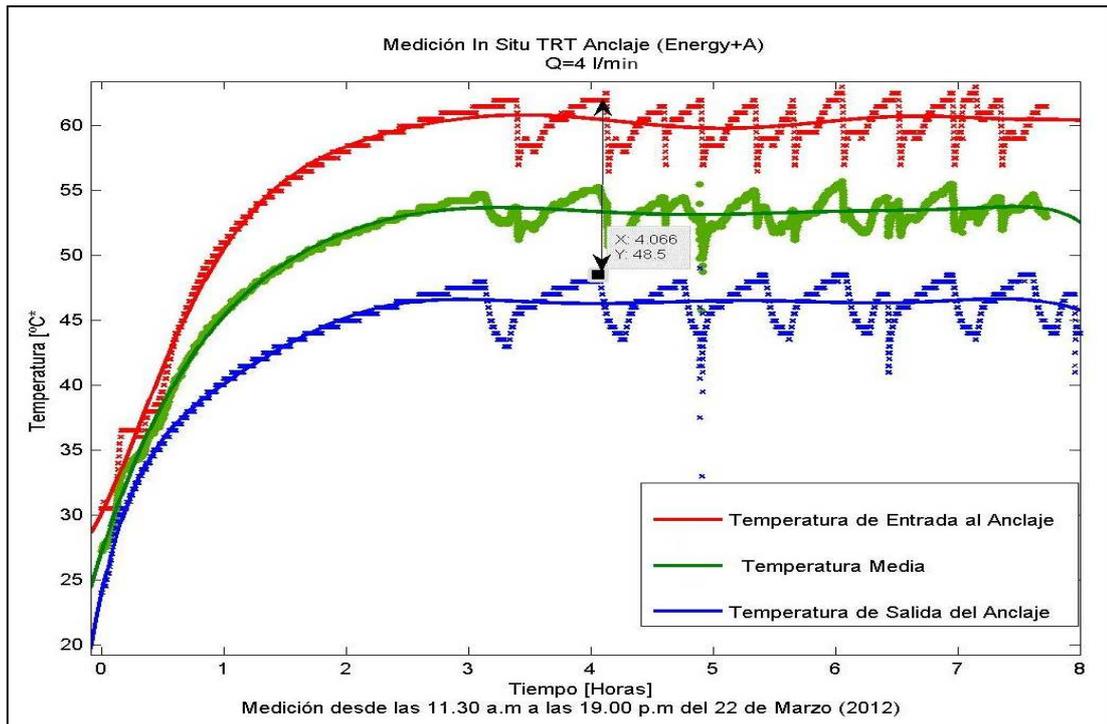


Figura 39. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 22/03/12.

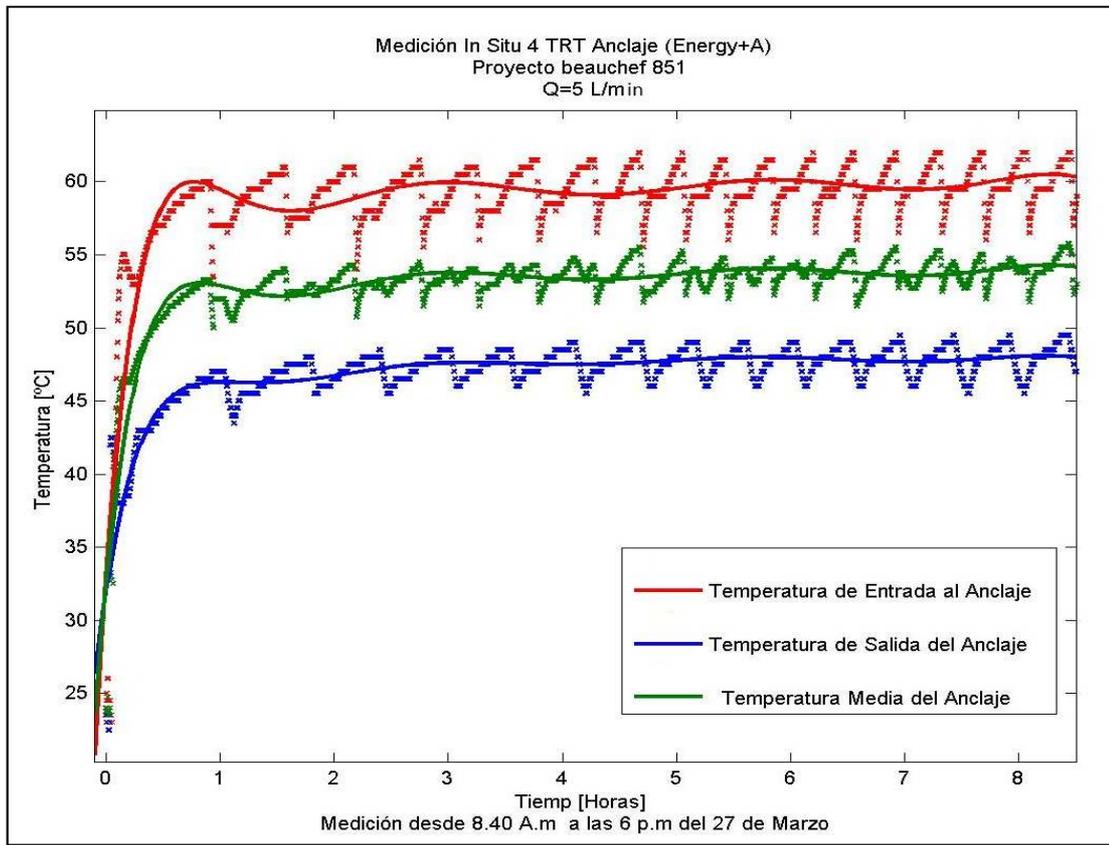


Figura 40. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 27/03/12.

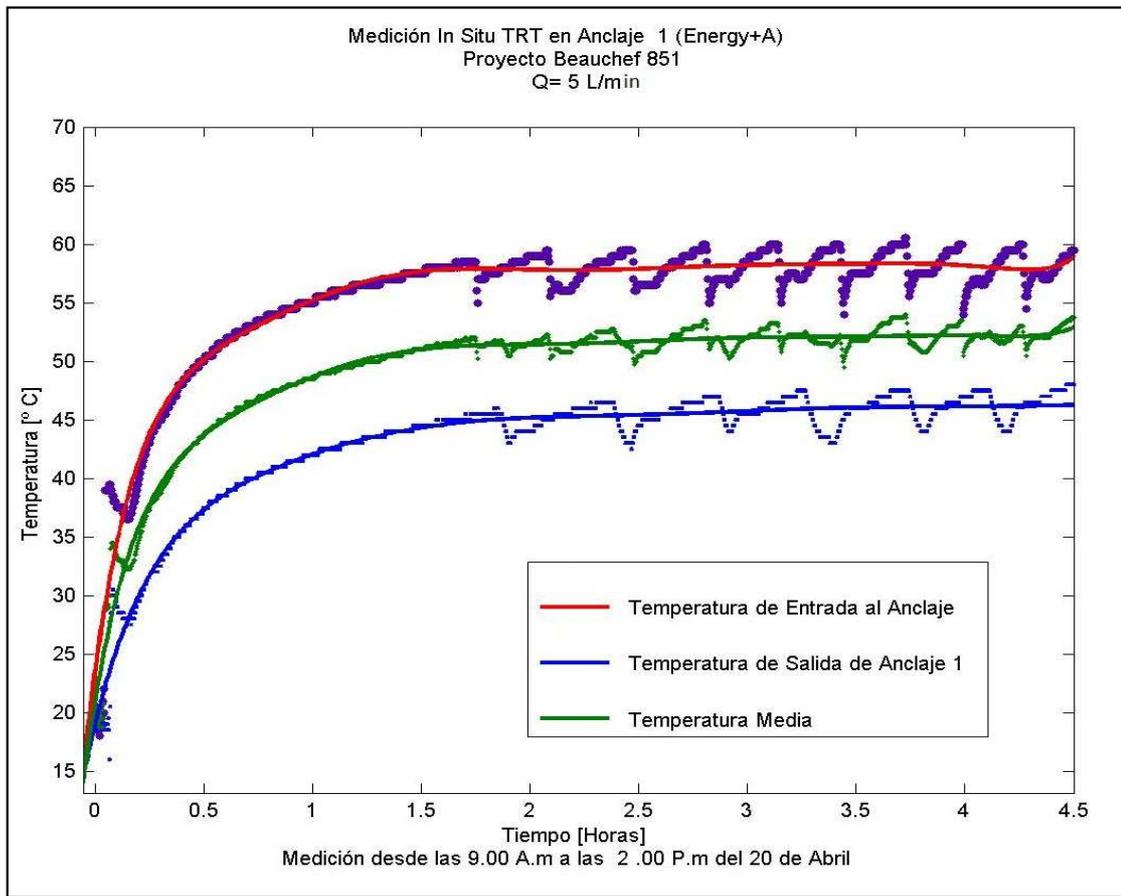


Figura 41. Medición in situ TRT en Anclaje a la fecha 20/04/12.

Anclajes Energéticos (Anclaje n° 2)

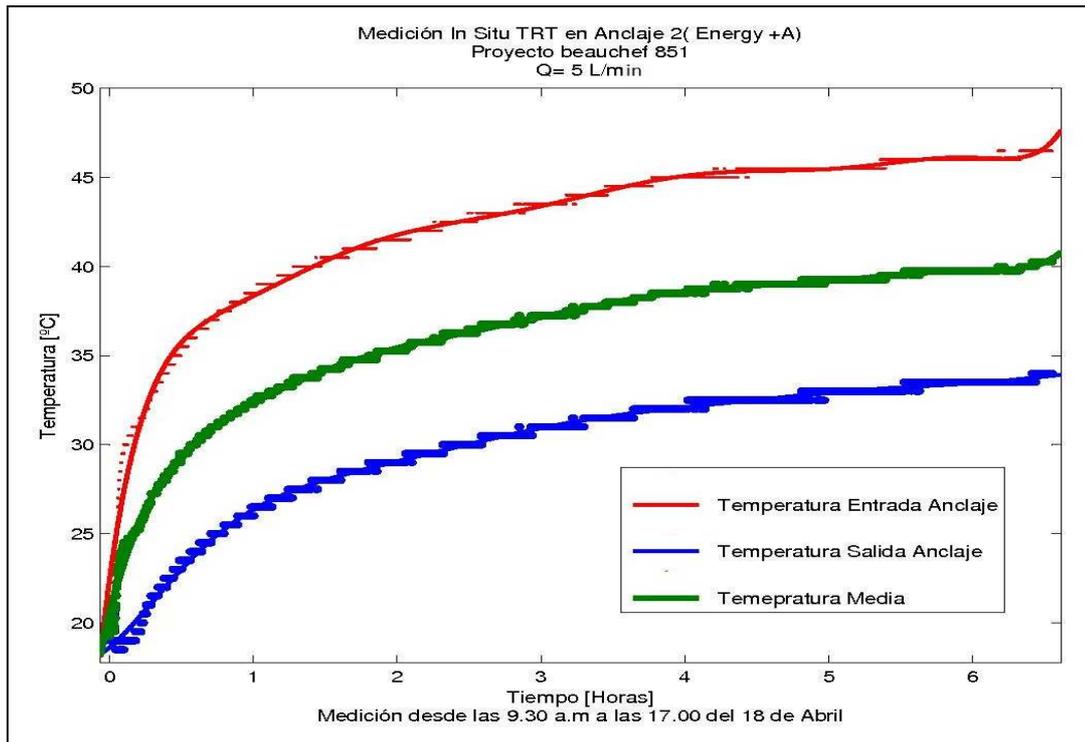


Figura 42. Medición in situ TRT en Anclaje 2 a la fecha 18/04/12.

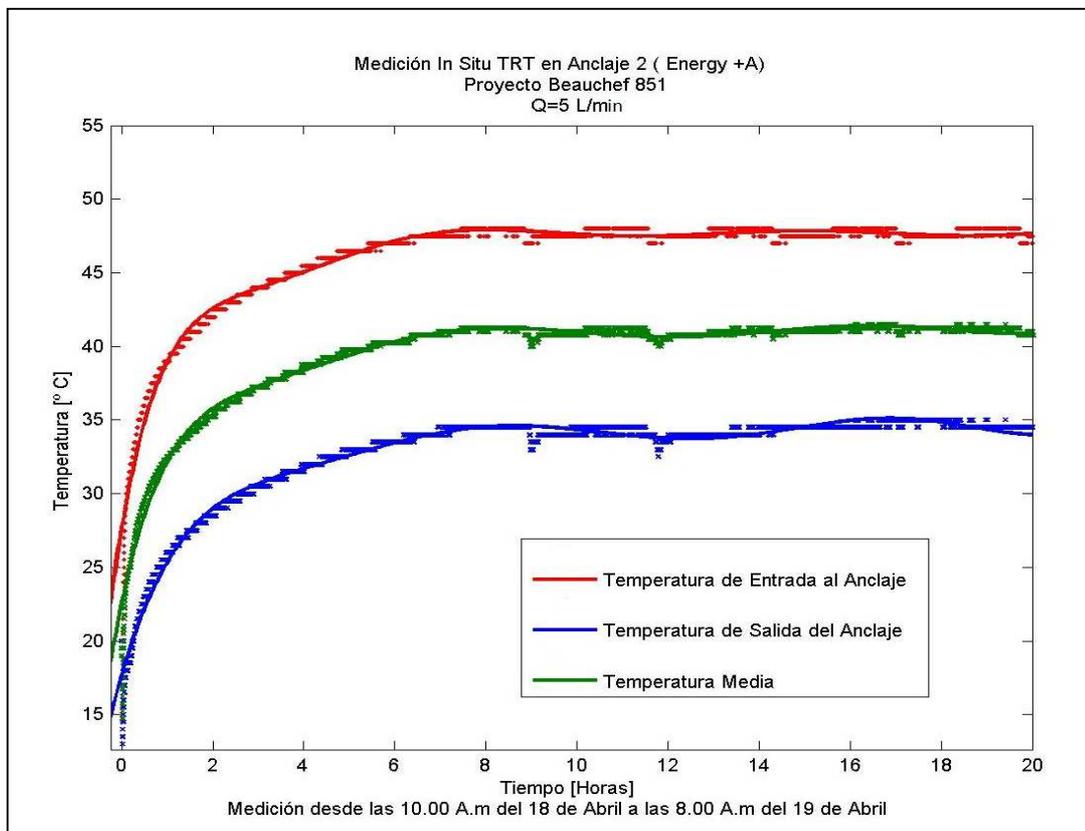


Figura 43. Medición in situ TRT en Anclaje 2 a la fecha 19/04/12.

Mediante las mediciones dinámicas que se observan desde la Figura 25 a la 27 se pueden apreciar las variaciones de temperatura del fluido que se hizo circular al interior de las instalaciones tanto por la exposición al ambiente de una de las caras de la Pila como de las cabezas de los sensores de los anclajes (también existió un aporte de la bomba hidráulica), ya que en esos casos el calefactor se mantuvo apagado. Con esto se corrobora la incidencia de la exposición a condiciones ambientales, pero para poder estimar cual instalación ve más influenciada la temperatura interior se realizaron las mediciones “estáticas” donde se pudo corroborar que el anclaje se ve mucho menos impactado térmicamente por el exposición a las condiciones ambientales que la Pila, esto se aprecia en las Figuras 34 y 35 donde se resumen las mediciones realizadas durante los meses de investigación y donde se puede apreciar cómo la curva de variación de temperatura del anclaje tiene una menor pendiente durante toda la medición, lo que significa una menor variación durante el día en comparación con los resultados obtenidos en la Pila.

Las diferencias encontradas en las mediciones realizadas durante una fecha muy próxima a otra medición en la misma instalación han demostrado que la inercia térmica del suelo es capaz de conservar una gran parte del calor, esto en primera instancia se refleja en la velocidad con que se llega por primera vez a la temperatura Peak en una medición. Por ejemplo, considerando el gráfico de la primera medición en la Pila se necesitaron más de 4.5 horas para alcanzar un valor de 61° C (Figura 36), por otro lado la Figura 37 representa la segunda medición en la Pila, llevada a cabo 5 días después, en este gráfico se observa que para alcanzar la misma condición de temperatura Peak, bastó de menos de 2 horas para lograrlo.

Las Figuras 36, 37 y 38 representan el test de respuesta térmica aplicado a la Pila triple-U. Las mediciones realizadas desde el mes de Marzo hasta Abril muestran la capacidad de la Pila (Suelo-Hormigón-Acero-Tuberías) al rechazo de calor inyectado desde la superficie, en ellas se aprecia que la temperatura promedio alcanzada (Curva verde en Figuras) llega a los 53 °C considerando que a los 62°C el calefactor tenía la falla explicada en el capítulo 4.

Las Figuras 39, 40 y 41 representan la aplicación del test de respuesta térmica al Anclaje 1, estas mediciones se realizaron entre los meses de Marzo y Abril, en ellas se muestra también la capacidad al rechazo de calor que tiene esta implementación, considerando un medio compuesto por Suelo-Lechada-sensores de Acero-Tuberías alcanzando temperaturas promedio muy similares a las de la Pila

Las Figuras 42 y 43 representan las mismas mediciones explicadas previamente pero aplicadas a un nuevo Anclaje (Anclaje 2) ubicado a continuación del Anclaje 1, este anclaje muestra importantes diferencias entre los resultados obtenidos en el Anclaje 1, alcanzando una temperatura promedio de 40 °C en condiciones de equilibrio. Esta diferencia en primera instancia se justifica por un problema del entorno del suelo en que se ubica la implementación, ya que sobre este suelo existe un orificio que permite el derrame de agua desde el baño de la obra sobre el suelo en cuestión, por lo que estaría mejorando las propiedades del suelo saturado, logrando rechazar aún más calor, motivo por el cual la temperatura difiera del Anclaje 1 en casi 13°C.

7. OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

La obtención de la conductividad térmica del sistema, está basado en la aplicación de la ecuación de Ingersoll & Plass (1948). Esta ecuación utiliza como principal Input la temperatura promedio entre la temperatura de entrada a la instalación y la temperatura de salida de la instalación (Pila y Anclajes). Graficando los datos obtenidos de temperatura promedio en la ecuación de Ingersoll & Plass (1948) en escala Logarítmica (natural) se genera una recta de la cual nos interesa la pendiente de esta, valor asociado a la conductividad térmica de un medio.

Los periodos que han sido considerados en cada medición para calcular el parámetro Conductividad de cada sistema han sido seleccionados de acuerdo a criterios ya mencionados.

En primer lugar se considerará la siguiente regla para el tiempo mínimo obtenida de los criterios de medición utilizados en Gehlin (2002).

Una buena medición, con errores bajo el 2.5 % saldrá de considerar que se cumpla la ecuación $\frac{at}{r^2} > 20$ para obtener el tiempo se reordena la expresión de la siguiente manera:

$$t \geq \frac{20r^2}{a}$$

En el caso de la Pila esto se cumplirá para $\ln(t) > 8.54$ (t tiempo en horas), y en el caso del Anclaje energético esto se cumplirá para $\ln(t) > 7.59$, en términos de logaritmo natural del tiempo.

Por lo tanto el límite inferior que se consideró fue de $\ln(t) = 8.54$ y $\ln(t) = 7.59$, y el límite superior como el tiempo en que se produce el primer peak.

Las Figuras 44 a 49 muestran los gráficos representativos de la aplicación de la ecuación de Ingersoll & Plass (1948) a la temperatura media de cada medición realizada (test de respuesta térmica), en cada gráfico se muestra explícitamente el valor de la pendiente de la recta obtenida. El resultado final de cada parámetro obtenido se muestra desde la Tabla 3 a la 8. De todas las mediciones realizadas sólo se muestra el resultado de dos mediciones por instalación, se han elegido aquellas que fueron realizadas sin una previa inyección fuerte de calor para no alterar las condiciones del terreno.

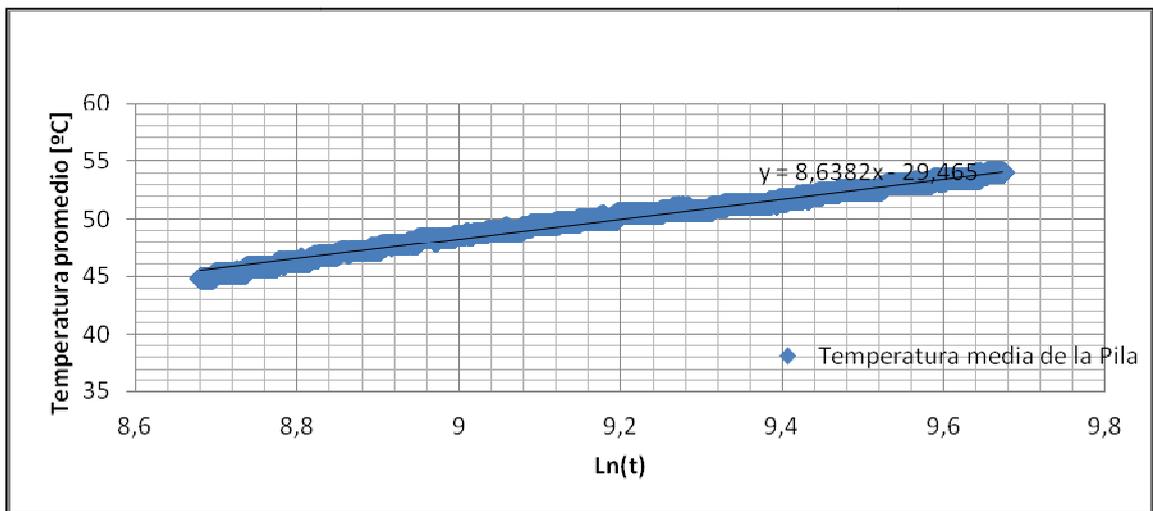


Figura 44. Medición n° 1: Pila de Entibación.

Tabla 3. Medición 1 Pila triple U.

Pila triple-U	
Potencia [W]	5240
L [m]	30
K(pendiente)	8,64
Conductividad térmica [W/mK]	1,610

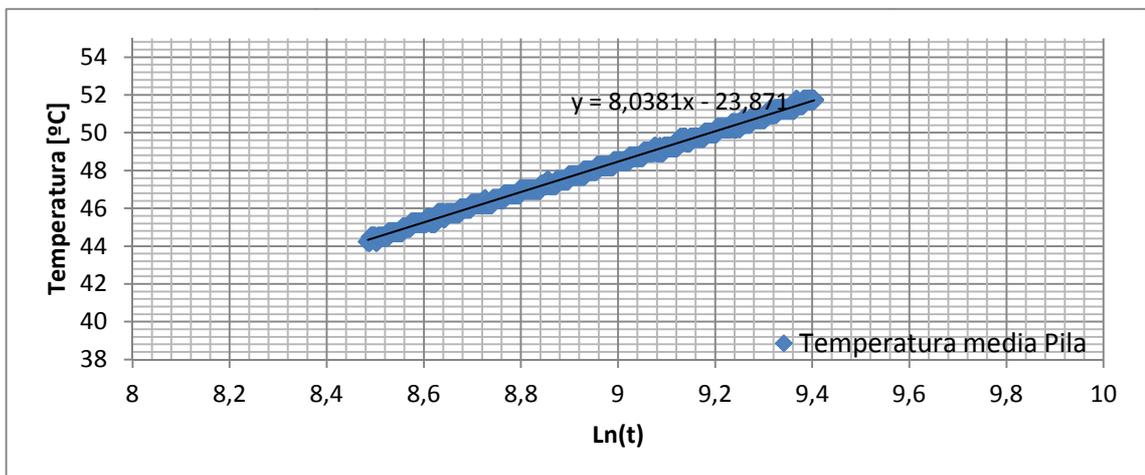


Figura 45. Medición n° 2: Pila de Entibación.

Tabla 4. Medición 2 Pila triple U.

Pila triple-U	
Potencia [W]	5098
L [m]	30
K(pendiente)	8,04
Conductividad térmica [W/mK]	1,684

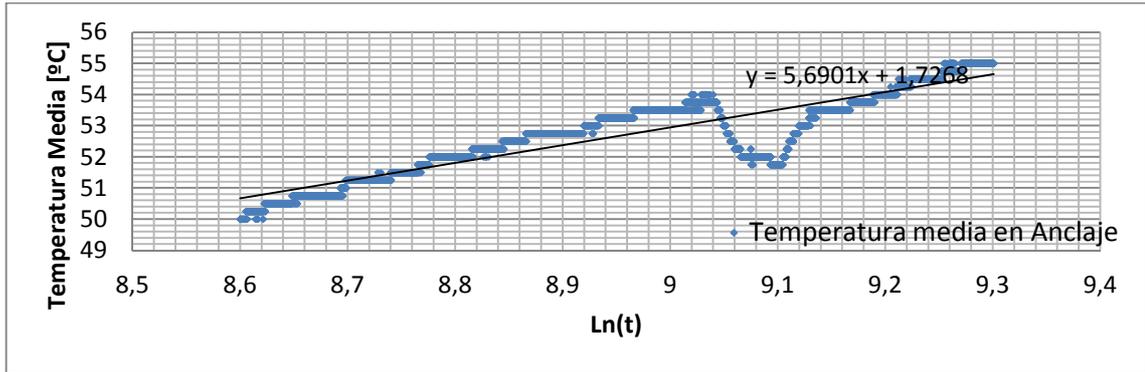


Figura 46. Medición nº 3: Anclaje 1.

Tabla 5. Medición 3 Anclaje 1.

Anclaje 1	
Potencia [W]	4995
L [m]	41
K(pendiente)	5,69
Conductividad térmica [w/mK]	1,703

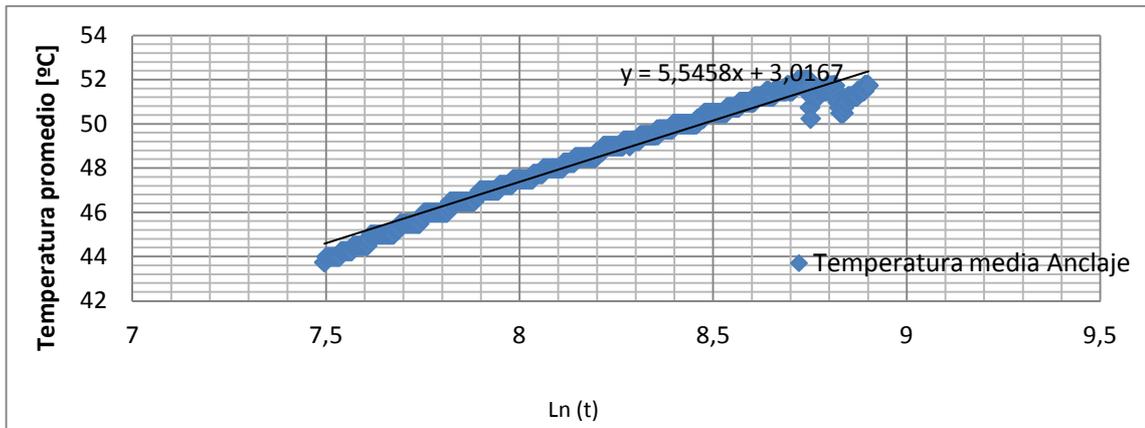


Figura 47. Medición nº 4: Anclaje 1.

Tabla 6. Medición 4 Anclaje 1.

Anclaje 1	
Potencia [W]	4950
L [m]	41
K(pendiente)	5,55
Conductividad térmica [w/m]	1,731

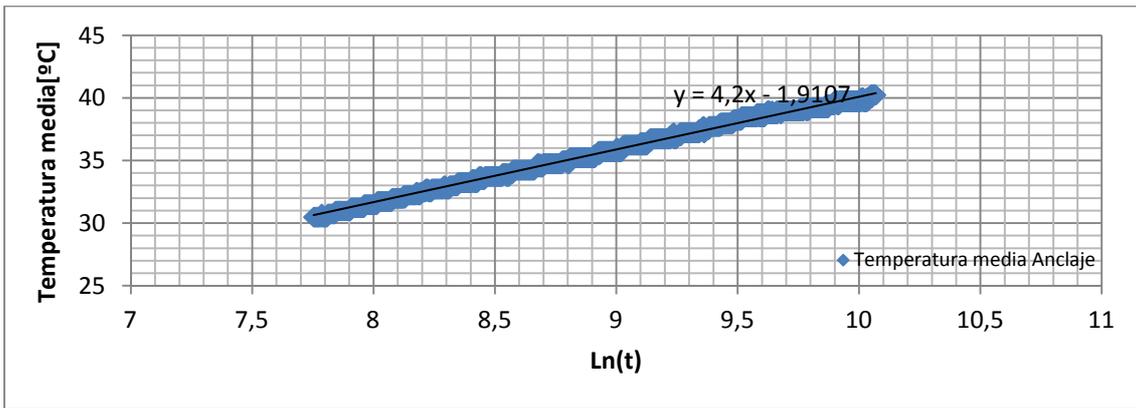


Figura 48. Medición n° 5: Anclaje 2.

Tabla 7. Medición 5.

Anclaje 2	
Potencia [W]	5102
L [m]	41
K(pendiente)	4,2
Conductividad térmica [w/mK]	2,326

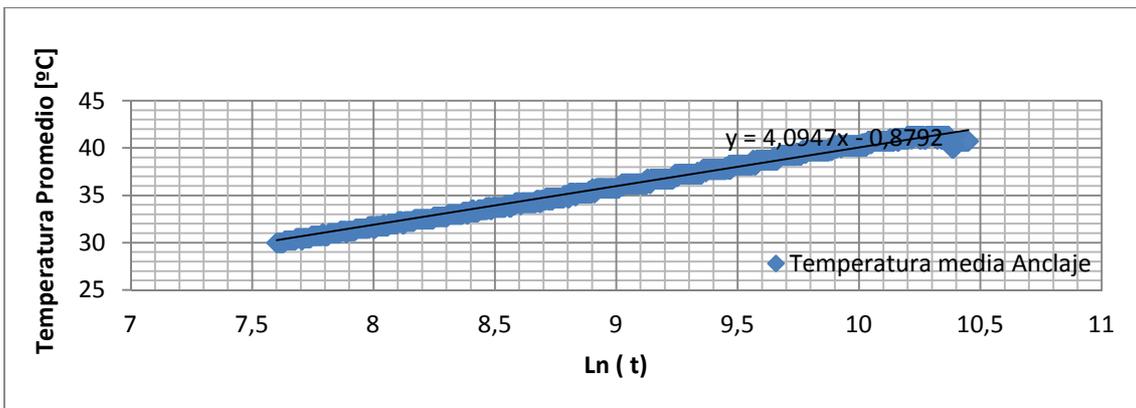


Figura 49. Medición n° 6: Anclaje 2.

Tabla 8. Medición 6.

Anclaje 2	
Potencia [W]	5093
L [m]	41
K(pendiente)	4,09
Conductividad térmica [w/mK]	2,412

De acuerdo a los resultados obtenidos en desde la Figura 44 a la 49 se muestra la Tabla 8 con el resumen de los valores finales obtenidos para cada instalación y se agrega una tercera columna en la tabla donde se ha expresado el error entre mediciones, se ha asignado un error con valor 0 a la primera medición y con respecto a este valor se ha calculado el porcentaje de diferencia entre valores representativos de una misma instalación:

Tabla 9. Resumen de valores obtenidos de conductividad térmica por instalación.

Sistema Medido	Conductividad [W/mK]	% Error con respecto a primera Medición
Pila triple-U	1,61	0
Pila triple-U	1,68	4,5
Anclaje 1	1,70	0
Anclaje 1	1,73	1,5
Anclaje 2	2,32	0
Anclaje 2	2,41	3,6

En la tabla 9, se aprecian valores consistentes entre los resultados obtenidos por cada ensayo y lo esperado por el tipo de material que rodea a las tuberías embebidas tanto en la Pila como los Anclajes. En el caso de la Pila, ésta está fabricada con hormigón armado, y estudios han demostrado que el valor de la conductividad térmica del hormigón alcanza el valor de 1,6 W/mK (Sevilla, 2009), por lo cual los resultados encontrados resultan razonables.

En el caso de los Anclajes, éstos han sido diseñados con una serie de cables de acero rodeado hasta rebalsar de una lechada de hormigón en toda su extensión. Por otro lado existe una mayor proximidad (con respecto a las Pilas) con el suelo (grava de Santiago) de las tuberías del Anclaje, por lo que era de esperar obtener valores superiores al 1,6 W/mK.

Para el caso del Anclaje nº 2 (Anclaje 2) se produjo una respuesta completamente distinta a los otros casos estudiados. En primer lugar el ensayo se logró de manera correcta, con el calefactor encendido durante las 20 horas de duración, condición que no se logró cumplir en las otras instalaciones, donde el calefactor se apagaba cada vez que la temperatura del agua alcanzaba los 62 grados. En este caso la conductividad térmica efectiva alcanzó valores sobre los 2,3 W/mK para el mismo suelo, misma geometría y temperatura ambiente que el Anclaje 1. La primera explicación para este resultado que en el caso de ser real es un valor muy prometedor, pero que dado su ubicación debe estar alterado por factores de terreno es que el suelo en dónde está ubicado este Anclaje tuvo descargas de agua aumentando la humedad de la zona (suelo) mejorando las propiedades térmicas del suelo (enfriándolo) y de esta forma aumentar la tasa de rechazo en el suelo y finalmente restringiendo el aumento de la temperatura del agua circulante a solo 48° y no 62° como en los otros ensayos. Los valores que finalmente representan las instalaciones (1,6 W/mK Pilas y 1,7 W/mK Anclaje) siguen permitiendo entrar en la categoría de aprovechables, ya que de acuerdo a investigaciones extranjeras y basados en la norma alemana VDI 4640 un suelo será aprovechable sobre una conductividad térmica de 1,5 W/mK.

El caso particular de la Figura 46, donde se aprecia un salto en la curva, se debe únicamente a la consideración de tomar como límite superior de la curva la temperatura alcanzada en el segundo peak, debido a que en el primer peak no se logró una temperatura tan elevada como en los casos anteriores.

7.1 Análisis Caso Anclajes (Sondajes Inclinados)

El sistema implementado en los Anclajes cuenta con una geometría completamente distinta a cualquier tipo de sondaje visualizado o visto en publicaciones de obtención de geotermia de baja entalpía.

La teoría que más se asimila al caso Anclajes inclinados es la desarrollada por Cui et al. (2010) en China, en la cual se analiza el comportamiento térmico de un Borehole inclinado. Para la correcta consideración del largo total del Anclaje con funcionamiento térmico óptimo, fue fundamental poder comprender cómo se produce la transferencia de calor si existe una inclinación de las tuberías acopladas a los Anclajes. Esta explicación fue abordada con la teoría mostrada a continuación:

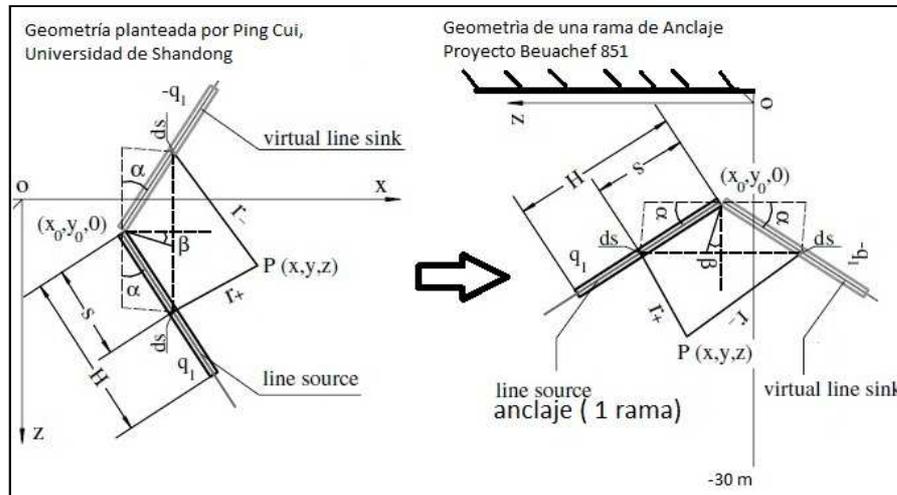


Figura 50. Geometría de una fuente lineal inclinada (Cui et al., 2010).

El aumento de temperatura en un punto P cualquiera para un tiempo t puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{q}{4k\pi} \int_0^H \left\langle \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r^+}{2\sqrt{at}}\right)}{r^+} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r^-}{2\sqrt{at}}\right)}{r^-} \right\rangle ds \quad (5)$$

Dónde:

$$r^+ = \sqrt{(x - x_0 - s \sin \alpha \cos \beta)^2 + (y - y_0 - s \sin \alpha \cos \beta)^2 + (z - s \cos \alpha)^2} \\ r^- = \sqrt{(x - x_0 - s \sin \alpha \cos \beta)^2 + (y - y_0 - s \sin \alpha \cos \beta)^2 + (z + s \cos \alpha)^2}$$

T(x, y, z, t)=Función temperatura para un punto en el espacio definido por las variables x, y, z de cada plano cartesiano del espacio para un tiempo t.

To [°C]=Temperatura inicial

H [m]= Largo de la instalación

r [m]=Radio de alcance térmico

a [m²/s]=Difusividad térmica del suelo

q [W]=Calor inducido

x, y, z, x₀, y₀, z₀=Variables de distancia en los ejes planteados

k [W/m/k]= Conductividad térmica del suelo

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (\text{Función error de Gauss})$$

Introduciendo las siguientes variables adimensionales:

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad Z = \frac{z}{H}, \quad Xo = \frac{x_0}{H}, \quad Yo = \frac{y_0}{H}, \quad Fo = \frac{at}{H^2}, \quad \theta p = \frac{(T(x,y,z,t)-T_0)4k\pi}{q}$$

El aumento de temperatura adimensional causado por una fuente lineal puede ser expresado como la función que se muestra a continuación:

$$\theta p = fn(X, Y, Z, Xo, Yo, \alpha, \beta, Fo) \quad (6)$$

Parametrizando las variables de posición de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x &= l \sin \alpha + r_b \cos \alpha \cos \omega \\ y &= r_b \sin \omega \\ z &= l \cos \alpha - r_b \sin \alpha \cos \omega \end{aligned}$$

Con ω como el ángulo de la sección transversal moviéndose entre $0 < \omega < 2\pi$

Introduciendo la parametrización de x, y, z en la ecuación del punto P determinada por r_+ y r_- y analizando el problema de acuerdo a la simetría existente en el plano XOZ, la función adimensional del aumento de temperatura queda determinado con la siguiente expresión:

$$\theta \omega(L, Rb, Fo, \alpha, \omega) = \int_0^H \left\langle \frac{\text{erfc}\left(\frac{r_+}{2\sqrt{at}}\right)}{r_+} - \frac{\text{erfc}\left(\frac{r_-}{2\sqrt{at}}\right)}{r_-} \right\rangle ds \quad (7)$$

Dónde:

$$Rb = \frac{r_b}{H}, \quad L = \frac{l}{H}, \quad S = \frac{s}{H}$$

Dónde Rb, L, S son largos adimensionales utilizados.

Por lo tanto la temperatura en la zona donde se ubica una fuente lineal queda determinada por la integral a lo largo de toda la sección entre $0, \pi$ debido a la simetría del problema:

$$\theta c(L, Rb, Fo, \alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \theta \omega d\omega \quad (8)$$

Por lo que la solución numérica en función de las variables adimensionales se observa en la Figura 51.

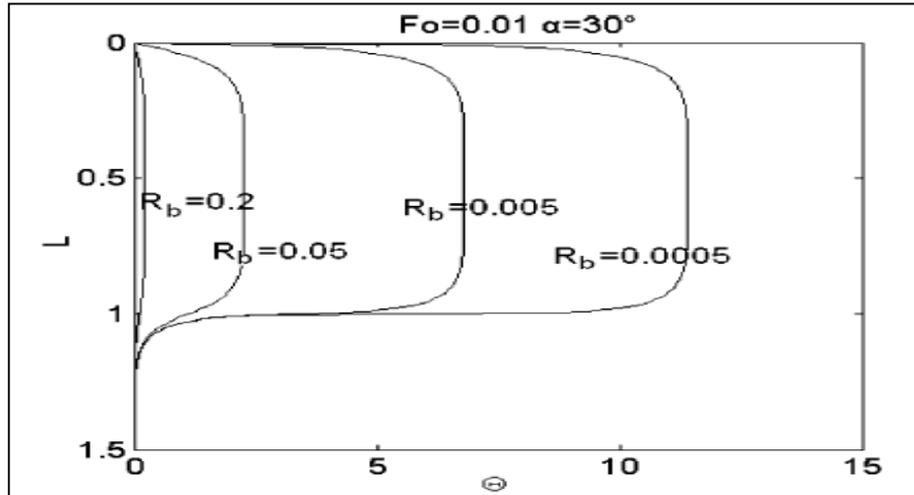


Figura 51. Perfil de temperaturas a lo largo de la profundidad “Borehole inclinado” para diferentes radios (Cui et al., 2010).

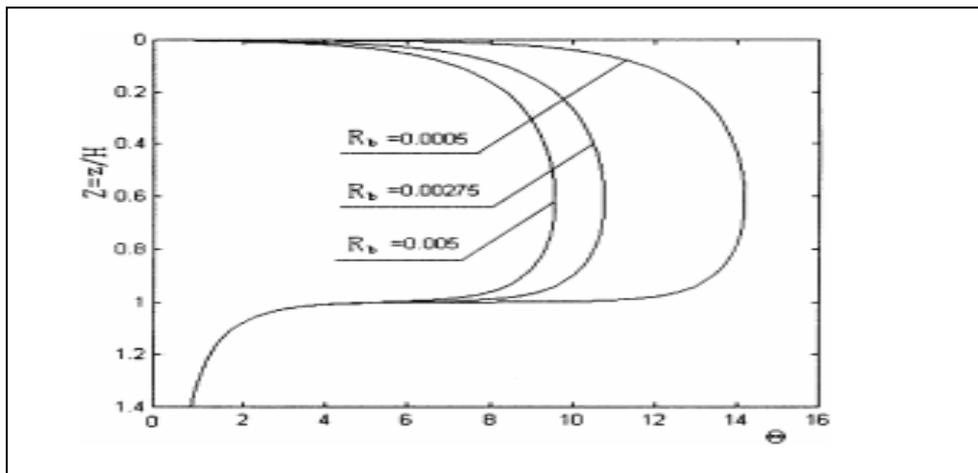


Figura 52. Perfil de temperaturas a lo largo de la profundidad “Borehole vertical” para diferentes radios (Zeng et al., 2002).

Las Figuras 51 y 52 muestran el resultado del perfil de temperaturas para un radio y largo variable en el caso de la Figura 51 es un análisis con una inclinación y la Figura 52 es una vertical. De acuerdo a lo anterior se entiende que la temperatura de la superficie del sondaje o fuente lineal varía con la profundidad de manera casi idéntica a la variación que se produce en una instalación vertical.

De acuerdo a esta teoría el problema de condiciones de borde del caso estudiado en la memoria (Anclajes como Boreholes inclinados) se asume que la respuesta térmica de los sondajes inclinados es la misma que la de uno vertical. Para una mejor comprensión del

problema desde acá en adelante se asumen los Anclajes como si fueran verticales como se muestra en la Figura 53.

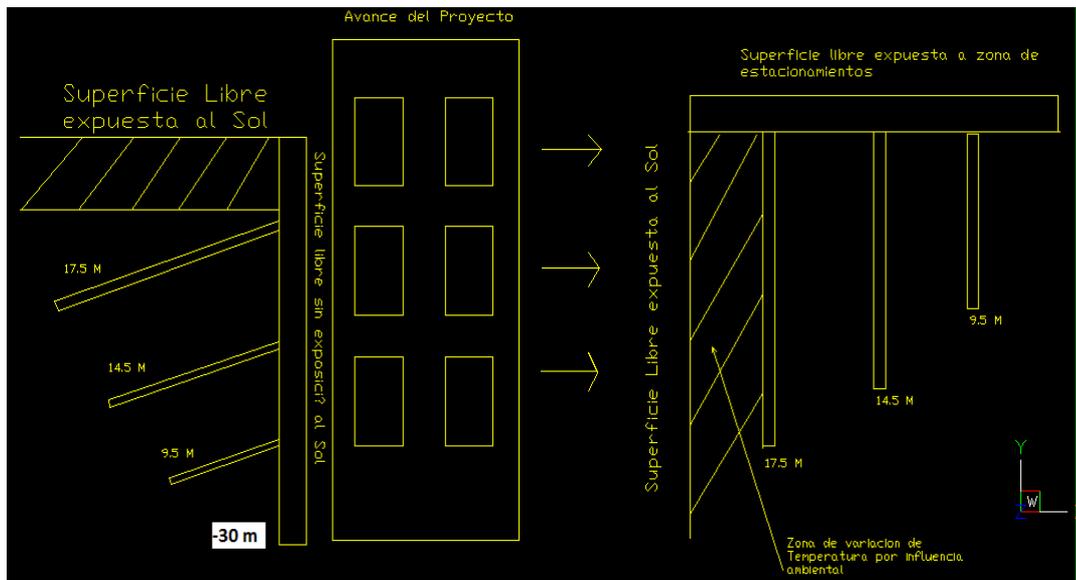


Figura 53. Problema de condiciones de borde de Anclajes.

De acuerdo a la Figura 53 y a la teoría de sondajes inclinados, ya es posible asumir que un Anclaje inclinado se comportará casi exactamente como si el sondaje estuviera inserto en el suelo de modo horizontal (representado en la Figura 53 de modo vertical sólo para una mayor comprensión visual). El siguiente problema a resolver es qué fracción de cada rama de los Anclajes se puede considerar representativa del rendimiento encontrado y qué fracción de cada rama es necesario no considerar por la influencia de las condiciones de borde. La comprensión de este problema será fundamental en el diseño óptimo de un Anclaje energético. Es por esto que en el estudio de la tasa de rendimiento se tomará originalmente un largo de 41 metros, representativo de la suma de las tres ramas del Anclaje embebidos en el suelo.

Resumiendo la tabla 9 de este capítulo se observa que no existen grandes variaciones en los valores de conductividad térmica obtenidos para la Pila (1.68 W/mK) y el Anclaje 1 (1.72 W/mK), por lo cual la Pila sería un mejor medio debido a su capacidad de recircular un mayor volumen de agua, por lo tanto aporta una mayor ganancia o ahorro energético. Para el caso del Anclaje 2 el valor obtenido como conductividad térmica (2.32 W/mK) seguirá siendo un valor sospechoso debido a que no se pudo corroborar la humedad del suelo hacia el interior de la instalación con alguna perforación y solo se logró visualizar en la superficie por el cambio de color del suelo (más oscuro que en sus alrededores) y por la ubicación del desagüe de la superficie de la obra en construcción.

8. ANÁLISIS DE LA TASA DE EXTRACCIÓN DE CALOR

Por la geometría de los Anclajes, y con la finalidad de poder comparar el rendimiento de los Anclajes y las Pilas, es necesario obtener tasas de rechazo de calor de acuerdo a diferentes parámetros de profundidad, el primer caso por analizar será por la profundidad natural de sus instalaciones que en el caso de la Pila es de 30 metros y de los Anclajes es de 41 metros resultado obtenido de la suma de los largos de las tres ramas del Anclaje.

Para el estudio de las tasas de rechazo del suelo se han realizado las siguientes mediciones:

Para el primer caso analizado se utilizó como fuente de calor la bomba hidráulica y esta medición se realizó en los meses de Enero y Marzo 2012, para el primer mes se contó con 15 metros de Pila expuesta al sol, y para el mes de Marzo con 5 metros de Pila expuesta. Es importante considerar que de acuerdo a las condiciones climáticas y la inyección de calor utilizada se han alcanzado temperaturas de entrada muy similares a las temperaturas que se usarían en un proyecto real, esto es en comparación con las mediciones que se realizaron a continuación donde la inyección de calor entregada por el calefactor logró generar temperaturas de hasta 60 grados, por lo cual aquellas tasas solo son demostrativas de la capacidad de rechazo del suelo, pero no muestran los valores que realmente se buscan.

Para el caso de la obtención de la tasa de rechazo se utilizó la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C_p * q * (T_{in} - T_{out})}{L}$$

Dónde:

Q [W/m]= Tasa de rechazo

q= Caudal [L/min]

Cp= Coeficiente térmico (Agua es igual a 1 cal/K/gr)

L= Profundidad de la instalación [m]

T=temperatura [°C]

Las tablas 10 y 11 muestran los resultados obtenidos por cada medición la principal diferencia entre cada medición es que en la primera se realizó con un caudal de circulación de 12 L/m, pero sin una inyección de calor significativa, en la segunda y tercera ronda se realizó con un caudal de 5 L/m pero con una inyección de calor directa desde el calefactor.

8.1. Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones sin fuente de calor (calefactor)

Tabla 10. Análisis de tasa de extracción utilizando la bomba hidráulica como fuente de calor.

Sobreexposición al sol por periodo Construcción	15 metros		5 metros	
	Caudal [L/m]	12	12	12
Dinámicos con calor de Bomba hidráulica+ Sol	Pila enero	Anclaje enero	Pila Marzo	Anclaje marzo
Ti [°C]	28,5	28,5	30,5	28
Ts [°C]	26,5	26,0	28,0	24,5
ΔT [°C]	2,0	2,5	2,5	3,5
Tasa de rechazo[W]	1666	2082	2082	2915
Tasa de rechazo[W/m]	56	51	69	71

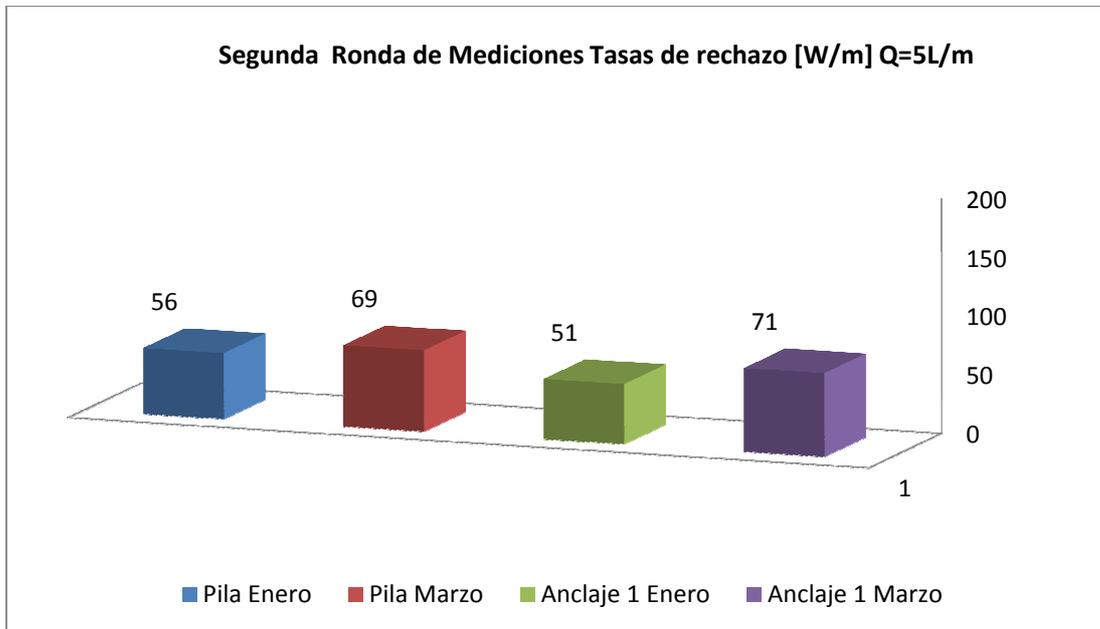


Figura 54. Primera Ronda de mediciones en terreno (2012) sin calefactor.

8.2. Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones con fuente de calor Enero-Marzo (calefactor)

Tabla 11. Análisis de tasa de extracción utilizando el calefactor como fuente de calor Enero-Marzo.

	ENERO		MARZO	
	Pila Medición 1	Anclaje 2 Medición 1	Pila Medición 2	Anclaje 1 Medición 2
Conductividad térmica [W/m/K]	1,69	2,19	1,86	1,61
Diferencia de T entrada y salida [°C]	14,3	12,9	15	12
Caudal de circulación [L/min]	5	5	5	5
Calor rechazado[W]	4962	4459	5236	4147
CASO CONSIDERANDO PROFUNDIDAD ALCANZADA CON LARGOS ORIGINALES DE LA INSTALACIÓN				
Profundidad de la Instalación [m]	30	41	30	41
Tasa de rechazo de calor [W/m]	165	108	175	101

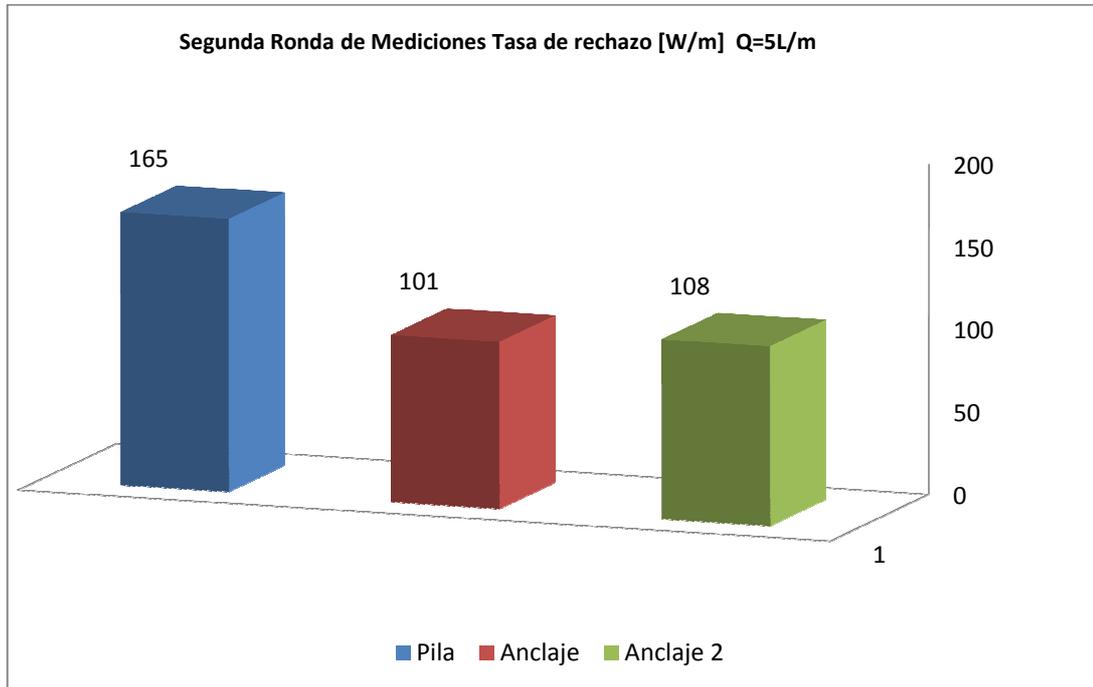


Figura 55. Segunda Ronda de mediciones en terreno (2012) con calefactor.

8.3. Evaluación de Tasas de rechazo por instalaciones con fuente de calor Abril (calefactor)

Tabla 12. Análisis de tasa de extracción utilizando el calefactor como fuente de calor Abril.

	ABRIL		
	Pila Medición 3	Anclaje 2 Medición 2	Anclaje 1 Medición 3
Conductividad térmica [W/m/K]	1,59	2,27	1,61
Diferencia de Tout – Tin [°C]	13,5	13,4	12
Caudal de circulación [L/min]	5	5	5
Heat rejection [W]	4685	4653	4292
CASO CONSIDERANDO PROFUNDIDAD ALCANZADA CON LARGOS ORIGINALES DE LA INSTALACIÓN			
Profundidad de la Instalación [m]	30	41	41
Heat rejection rate [W/m]	156	113	104

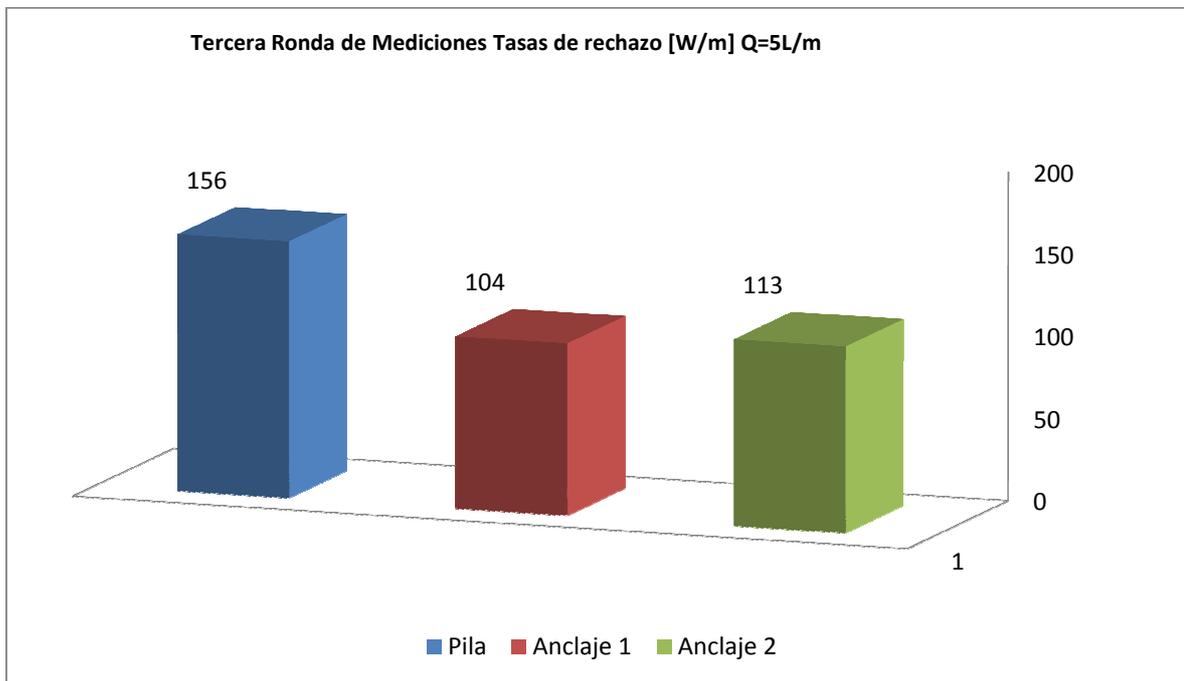


Figura 56. Tercera Ronda de mediciones en terreno.

Las Figuras 54 a la 56 muestra la clara tendencia de como la tasa de rechazo de una Pila supera a las tasas de rechazo obtenida en los Anclajes. El principal motivo de este resultado es la disposición geométrica de cada instalación. A lo largo de los 30 metros de Pila se tienen 6 ramas verticales, logrando llegar a cerca de 180 metros de tubería embebida (27 por cada rama) por lo cual por cada metro de profundidad se tienen 6 metros de tubería, a diferencia de los Anclajes que a pesar de tener una mayor longitud (41 m) solo tienen una ida y una vuelta, obteniendo 2 metros de tubería por cada metro de Anclaje. A pesar de que el Anclaje con solo 2 ramas logre una alta tasa de rechazo, dada las dimensiones de estas instalaciones, la posibilidad de mejorar este valor de rechazo de calor se ve restringida por el pequeño diámetro de este elemento.

Es importante considerar que los valores de tasa de rechazo obtenidos en promedio (150 W/m Pila y 110 W/m Anclaje) son valores alejados de la realidad a la hora de pensar en un funcionamiento, esto valores alcanzados se deben a la alta inyección de calor (cercano a los 5 KW) por lo cual aprovechando las propiedades del suelo, se logró alcanzar diferencias entre temperatura de entrada y salida de hasta 15 grados, delta de temperatura que no es aconsejable a la hora de utilizar una bomba de calor (máximo delta de temperatura de 5 grados en funcionamiento). En el caso del análisis que solo considera el calor entregado por la bomba hidráulica, se alcanzó una diferencia de 2 grados de temperatura entre el líquido entrante y saliente, de acuerdo a este delta de temperatura el Anclaje y la Pila funcionaron con tasas de rechazo muy similares, el Anclaje obtuvo tasas de rechazo de 71 W/m y 51 W/m y en comparación la Pila funcionó con tasas de 69 W/m y 56 W/m respectivamente.

En resumen el calor inyectado al terreno (en Pila y Anclajes) podría considerarse como los casos límites tanto la alta inyección de calor demuestra la aplicabilidad de esta implementación para algún caso en que se necesite bajar mayores temperaturas (de 60 grados a 45 grados de temperatura) como también pequeños diferenciales de temperatura, por lo cual queda pendiente la obtención de una tasa de rechazo que asemeje de mejor manera a un caso real de operación del sistema acoplado a los intercambiados de calor. La obtención de una tasa de extracción para un correcto diseño será crucial para estimar la vida útil de la zona por utilizar para mantener las propiedades térmicas del suelo, la Figura 57 muestra un correcto diseño apreciable al observar el calor que se mantiene en el suelo de fundación.

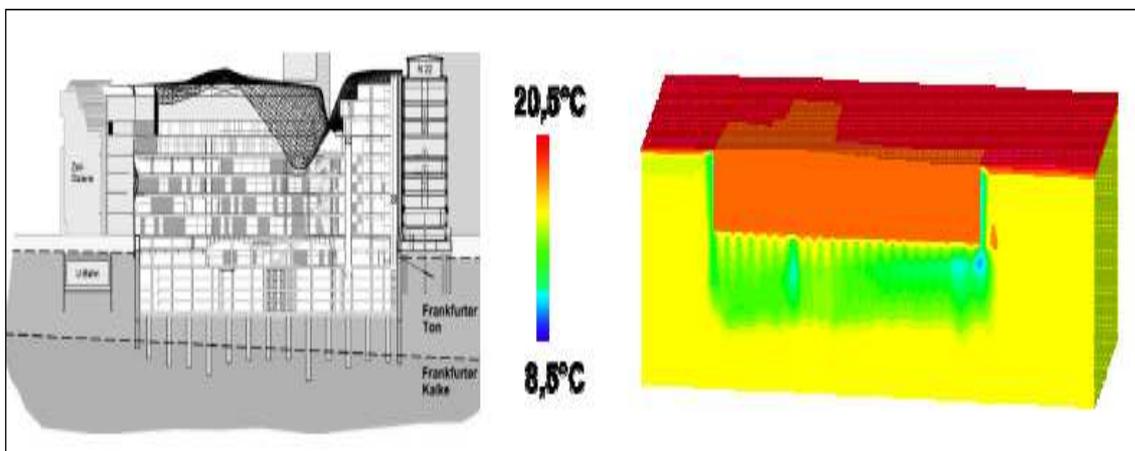


Figura 57. Edificio implementado en Frankfurt am Main y Radiografía de calor en el Suelo.

9. EVALUACIÓN DE DISEÑO PARA MEDIR EL APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LAS PILAS Y ANCLAJES ENERGÉTICOS

Los diseños de sistemas de climatización en base a la utilización de instalaciones geotérmicas de baja entalpía en países extranjeros ya se han normado y en particular la mayoría de estos sigue la norma Alemana VDI 4640 (parte 4). En esta norma se muestran las consideraciones técnicas, geográficas, constructivas y de diseño necesarias para asegurar un funcionamiento correcto de las instalaciones, de geotermia de baja entalpía. A la hora de realizar un diseño geotérmico las principales variables a considerar en este según la norma Alemana se detallan a continuación:

1. Selección de materiales de las tuberías instaladas
2. Definir profundidad de las instalaciones
3. Definir tipo de suelo (Estratigrafía)
4. Selección de tipo de sistema por implementar
5. Conductividad térmica determinada
6. Tasa de rechazo obtenida
7. Altitud de la ubicación del proyecto
8. Demanda energética base del área por climatizar
9. COP de la bomba de calor por utilizar
10. Selección de materiales constructivos utilizados en el proyecto (factor influyente en la demanda de energía)
11. Horas de uso anual.

La norma VDI 4640 aplica a instalaciones del tipo sondaje, instalaciones que pueden llegar a ser como la configuración de las implementaciones estudiadas en la memoria (6 ramas verticales) pero que en general apuntan a utilizar el valor de la tasa de rechazo que se obtiene directamente (obtenida con el TRT) y que no muestra una mayor influencia sobre las condiciones de borde que existan en el problema, como nuestras condiciones especiales de la Pila (cara expuesta al ambiente) o la condición especial del Anclaje energético (3 puntas expuestas al ambiente), es por esto que se ha decidido aplicar la Norma VDI 4640 para estudiar un caso particular con las materias primas mayormente utilizadas en Chile y con ubicación geográfica en Santiago, capital de Chile.

De acuerdo a los parámetros estimados en la VDI 4640 acerca de la relación entre la conductividad térmica de un suelo y el rendimiento esperado, se muestra en la Tabla 13 los valores obtenidos en la norma con el cálculo de los grados necesarios a reducir utilizando ya sea las Pilas o los Anclajes energéticos para los caudales utilizados en esta investigación, en este caso por cada categoría se han calculado los valores de variación de temperatura tanto para un caudal de 12 L/min como para 5 L/min.

Tabla 13. Variación de temperatura según tasa de rechazo de calor.

VDI 4640		Propuesta por caudal		
Medio	Valores generales		L=30 m	L=41m
Subsuelo λ [W / m / K]	Capacidad de extracción (W/m)	Caudal [L/m]	ΔT Pila necesaria	ΔT Anclaje necesaria
Terreno malo ¹ ($\lambda < 1,5$)	20	12	0,7	0,98
	20	5	1,7	2,4
Terreno normal ($1,5 < \lambda < 3$)	50	12	1,8	2,5
	50	5	4,3	5,9
Roca consolidada ($\lambda > 3$)	70	12	2,5	3,5
	70	5	6,1	8,3

¹ La conducción de calor con valores de conductividad térmica menores a 1.5 [W/mK] no es apropiada para su uso.

La columna que contiene los valores ΔT necesaria de la Tabla 13, explica que variación de temperatura se debería lograr en el caso de tener una instalación de largo L (en el caso explicado 30 m o 41 m), considerando que el suelo o medio tiene una capacidad de extracción de calor (tasa de rechazo W/m) como el que se explica en la columna Valores generales.

9.1. Primer dimensionamiento de una instalación

El diseño de instalaciones geotérmicas de baja entalpía basado en la norma VDI 4640 requiere la siguiente información para iniciar el dimensionamiento.

1. Potencia térmica necesaria (P_1):

En este ítem se considerará la demanda de potencia por calefacción por todos los metros cuadrados del área en estudio, además se podrá incluir la demanda de agua caliente sanitaria por todo el grupo de personas que habite el área determinada.

2. Energía térmica anual (E_{dda}):

En esta parte se considerará el número de horas anuales en que se utilizará esta potencia térmica calculada en el punto 1. Con el uso de una bomba de calor adecuada el número de horas anuales que se puede utilizar es de 1600h/año* en promedio que variará de acuerdo a la zona geográfica y al nivel de confort térmico que se espera tener en la zona determinada.

*Este valor se calculó de acuerdo a la suma de número de horas promedio mensual que se necesita climatizar un hogar para vivir en condiciones de confort térmico.

3. *Altitud (A)*

La altitud será un factor a considerar en el diseño de acuerdo a la estimación de que tan difícil sería llegar a una zona de roca consolidada o en general para estimar cuánto costará encontrar un suelo bueno térmicamente.

4. *Energía consumida por componentes eléctricos de la instalación (P₂):*

El primer costo energético es el del uso de una bomba hidráulica y a este se le deberá sumar el gasto por la bomba de calor. Esta se medirá en términos de kWh/año.

5. *Factor de Nomograma (α):* Utilizado en el Nomograma en que se basan los diseños de la norma VDI 4640 (parte 4).

$$\alpha = \frac{E_{dda}}{\frac{E_{dda}}{\beta} - P_2}$$

β= Coeficiente de rendimiento de la Bomba de calor

E_{dda}=Energía demandada

P₂=Energía demandada por aparatos utilizados

6. *Conductividad térmica (λ)*

Por último con todos estos parámetros conocidos se podrá determinar el largo total necesario de perforaciones que en el caso de las Pilas y Anclajes energéticos podrá determinarse como el número necesario de estos para llegar a ese largo.

En la Figura 58 se muestra el Nomograma presentado en la norma VDI 4640 para el dimensionamiento de las instalaciones geotérmicas.

9.2. **Consideraciones al utilizar norma VDI 4640**

La utilización de la norma Alemana VDI 4640 para instalaciones como las estudiadas en esta investigación deberán considerar la no linealidad en los resultados que se pueden obtener bajo la opción de resultados que la VDI 4640 puede entregar, ya que para una demanda fija y parámetros determinados de los que pide el Nomograma se podrá optar por la utilización de un sondaje de una profundidad o de dos sondajes de menor profundidad. Para una mejor comprensión de los resultados de la “no linealidad” de los largos de sondajes se sugiere el siguiente ejercicio. Dada una demanda térmica y una potencia fija de funcionamiento, sumado a una altura sobre el nivel del mar de la ubicación de la instalación y por último agregando un

factor de eficiencia de los equipos por utilizar y una conductividad térmica efectiva del medio se podría llegar a que por ejemplo se requiera un sondaje de 160 metros o la equivalencia según el Nomograma, dos sondajes de 105 m. De acá es donde se observa la no linealidad ya que los dos sondajes de 105 m suman 210 m de profundidad total en comparación con los 160 m, por lo que a medida que la profundidad de un sondaje aumente va tomando más peso que un largo equivalente ubicado a una profundidad menor. La Figura 58 muestra lo recién explicado.

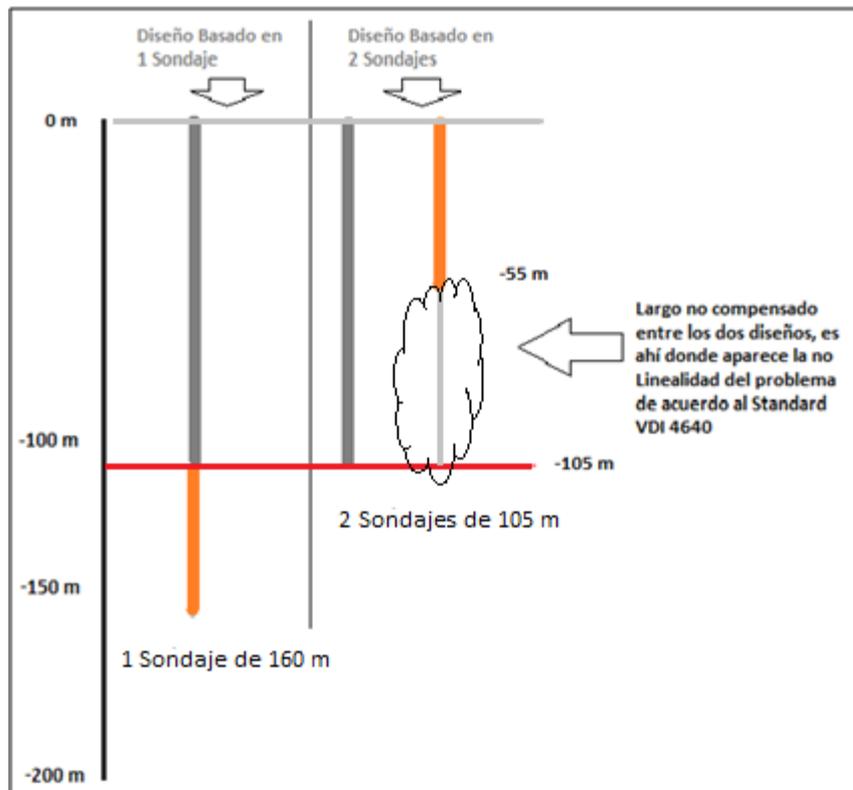


Figura 58. Compensación de largos entre diseño con 1 sondaje y 2 sondajes del VDI 4640.

9.3. Aplicación de norma VDI 4640 para la obtención de largos de sondajes en Pilas de acuerdo a una demanda energética.

En primer lugar se plantean las siguientes condiciones climáticas para el estudio del modelo (Ver Tabla 14).

Tabla 14. Condiciones climáticas propuestas.

Temperatura media Máximas verano
33,3 [°C]
Temperatura media Mínimas invierno
3,7 [°C]
Temperatura confort
20 [°C]

En la Tabla 15 se plantea una determinada área de estudio (casa de dimensiones estándar pero que utilice Termopanel como solución de ventanas), con los materiales de construcción comunes para el país, con esto se pretende calcular la demanda energética que existiría en su interior asociada a mantener una temperatura de Confort.

Tabla 15. Análisis de gasto energético área tipo.

Área basal estudiada	150 [m ²]		ΔT verano [° C]	ΔT invierno [° C]	Calor transferido o invierno [W]
	U [W/m ² K]	A [m ²]			
Componente					
Muro	1,9	112,5	13,3	16,3	3484
Ventana Termopanel	2,1	35	13,3	16,3	1198
cielo	0,47	140	13,3	16,3	1073
Total 1					5755
Perdidas por renovación de aire [W]					665
Total 1 + renovación aire [kW]					6,4
Total por metro cuadrado [W/m ²]					42,8

De acuerdo a este esquema generalizado se proyecta una demanda de potencia para un área determinada, en la Tabla 16 se muestra el área seleccionada, su ubicación y el espacio final que se abastecería, en resumen se tiene que para un área de 150 m² localizada en Santiago de Chile a una altura de 600 m.s.n.m se requeriría una fuente de climatización de 6.4 kW de potencia para que se mantenga una temperatura de confort interior. Este mismo ejemplo se amplifica a un área de 400 m² simplemente amplificando los valores proporcionalmente.

Tabla 16. Área abastecida según estudio.

Tabla anterior	
Área [m ²]	Potencia [kW]
150	6,4
Santiago	600 m.s.n.m
Caso de Área propuesta	
Área [m ²]	Potencia [kW]
400,000	17,12
Nº oficinas 5x5 m ² abastecidas	
16	

Dimensionamiento según VDI 4640:

1. Necesidad de Calefacción (tabla nº 16)

17.12 kW

2. Abastecimiento ACS (agua caliente sanitaria)=0.2 kW/persona x 6 personas

1.2 kW

3. Potencia térmica necesaria (Calefacción(17.12 kW) + ACS (1.2 kW))

18.32 kW

4. Energía térmica anual (Q)

Calefacción=17.12 kW x 1600 horas/año =**27250 kWh/año**

ACS=830 kWh/año x 6 personas= **4980 kWh/año**

Q=32.23 MWh/año

5. Altitud: Santiago

540 m.s.n.m

6. Energía consumida por Bomba de Calor

P=0.4 kW x 1600 horas/año=**640 kWh/año**

7. Factor de nomograma

$$\alpha = \frac{32230}{\frac{32230}{2.8} - 0.4 \cdot 1600} = 2.9$$

8. Conductividad térmica

$$\begin{aligned} \text{Pila} &= \mathbf{1.61 \text{ W/mK}} \\ \text{Anclaje} &= \mathbf{1,73 \text{ W/Mk}} \end{aligned}$$

Con estos valores se estimará el dimensionamiento, esto vale decir los metros de profundidad necesarios para cumplir la demanda requerida utilizando una bomba de calor. Para continuar con el dimensionamiento habrá que proyectar los valores detallados del punto 1 al 8 en el nomograma y de ese gráfico saldrá la profundidad necesaria. El nomograma utilizado se ha obtenido de la norma alemana VDI 4640.

La Figura 56 muestra la proyección de datos en el nomograma, en este caso como la potencia térmica y la energía térmica anual sobrepasan los límites del gráfico se aplicará la regla siguiente:

Se diseña a la mitad del sistema ($Q/2$ y $P1/2$) manteniendo los valores de la potencia de la bomba y del factor del nomograma, y una vez encontrado los resultados, estos se multiplicarán por dos.

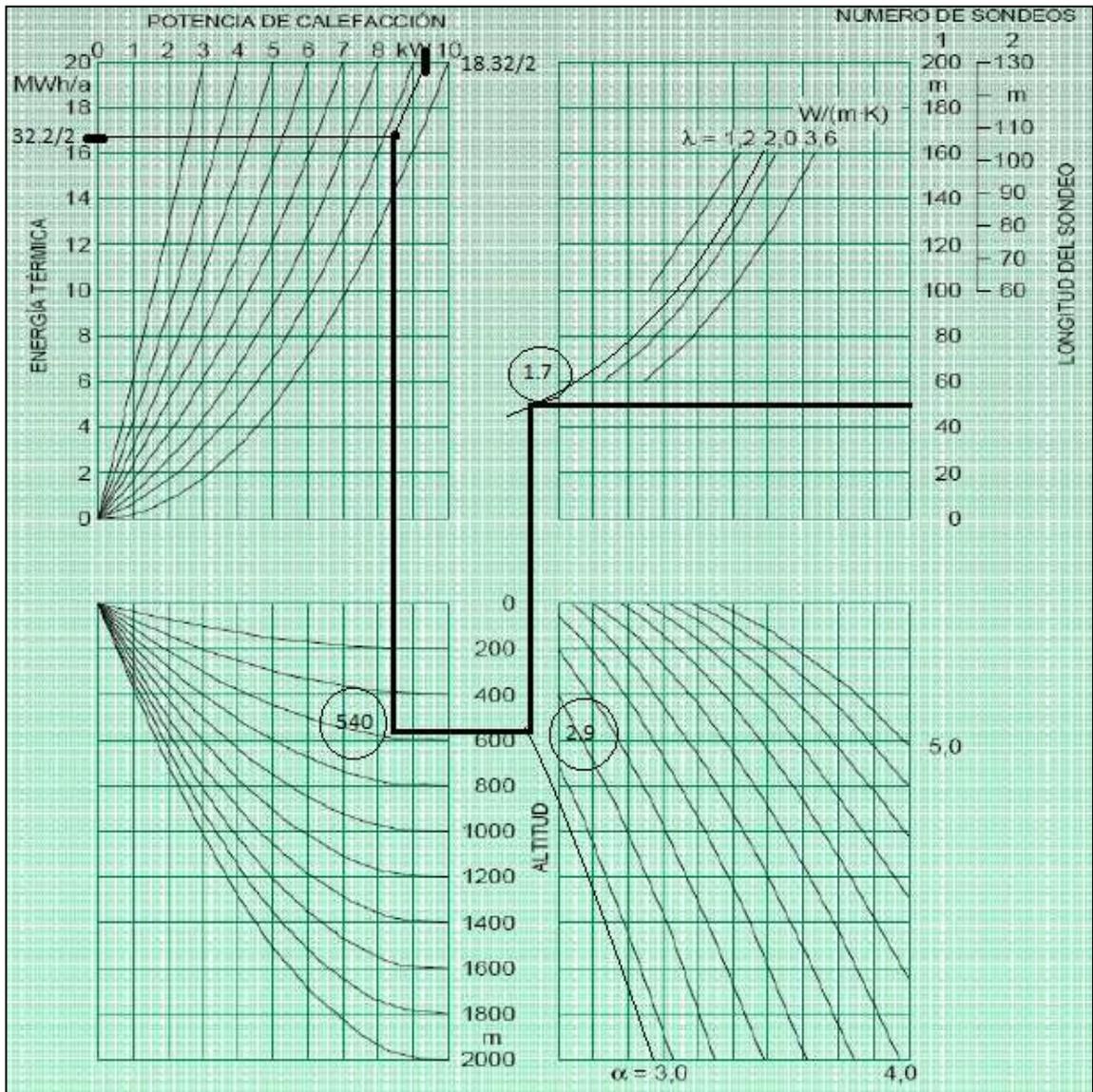


Figura 59. Nomograma de la norma VDI 4640.

De acuerdo a la metodología empleada para el dimensionamiento, se observa que en el Nomograma (Figura 59) se utilizó tanto para la Potencia de calefacción como para la Energía térmica solo un medio del valor total calculado. Este procedimiento se ocupa cuando la potencia de calefacción sobrepasa el límite del Nomograma (10 kW). Procedimiento de diseño obtenido de Serrano (2012) y el utilizarlo implica que una vez terminado el análisis según el Nomograma es necesario multiplicar por dos las dimensiones obtenidas, ya sean para el caso de la utilización de 1 sondaje, como para la de 2.

El valor obtenido en este diseño para satisfacer la demanda planteada inicialmente (18,3 kW de potencia para 400 m²) es de un sondaje de 50 m (Figura 59) pero de acuerdo al procedimiento recién explicado se deberán considerar 2 sondajes de 50 m, o sea 100 m de sondaje (profundidad). A groso modo este valor equivale a más de 3 Pilas de las utilizadas en esta investigación por lo que utilizando un criterio conservador se utilizarán 4 Pilas

para satisfacer esta demanda energética. Debido a estos resultados y tomando las consideraciones de diseño planteadas en este capítulo se obtiene que estos 100 m de sondaje equivalentes 4 Pilas implementadas, serán capaces de generar una Potencia térmica de 18,32 kW que servirán para abarcar a 400 m².

Este análisis sirvió finalmente para determinar que a una de las Pilas implementadas se le puede asociar una Potencia de 4,58 kW, que servirían para satisfacer una demanda térmica de un área habitable de 100 m² (utilizando un criterio conservador)

9.4. Aplicación de la Norma VDI 4640 para la obtención de la demanda energética suplida con Anclajes

Para la obtención del alcance efectivo de una instalación geotérmica como las implementadas en el proyecto Beauchef 851 se utiliza nuevamente la Norma Alemana pero en el sentido inverso al utilizado en el dimensionamiento anterior. Dado los resultados de las mediciones con el TRT en terreno, y al largo de tuberías bajo tierra que se implementó en los Anclajes (41 m) se plantea el siguiente procedimiento:

Datos:

Conductividad térmica efectiva Anclaje: 1.7 W/mK

Largo embebido en el suelo: 41 m

Altitud promedio de Santiago: 540 m.s.n.m

Horas de funcionamiento anual en Santiago (Chile): 1600 h/año

Eficiencia de equipos: 2.8

Potencia de Bomba de Calor: 0.4 kW

De acuerdo a esta información se ha graficado en la Figura 60 el factor del nomograma (α) en función de la energía calórica demandada que permita de acuerdo a los parámetros de la instalación (1,7 W/mK, 41 m) hacer un diseño inverso (Figura 60):

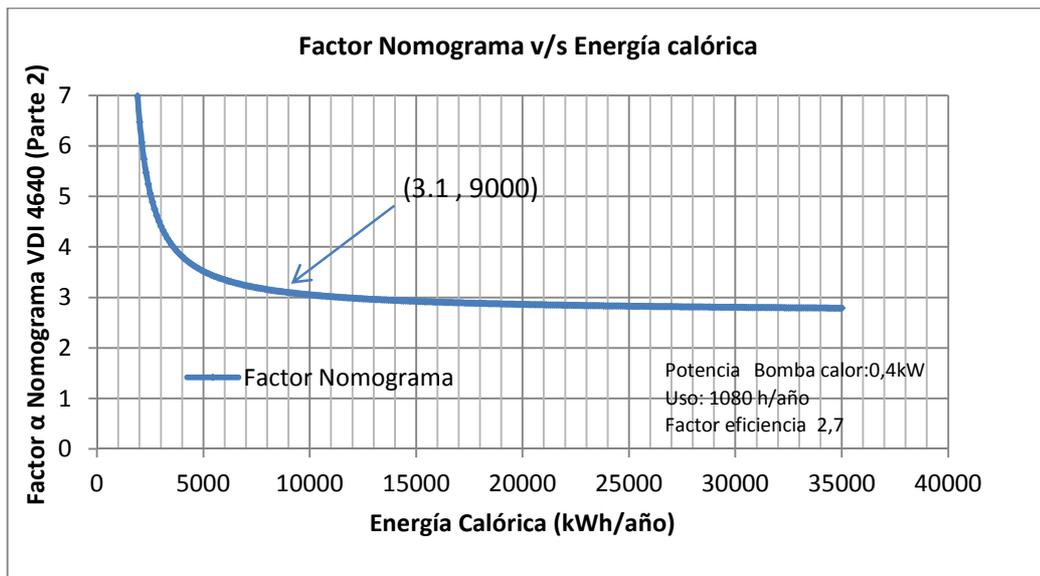


Figura 60. Gráfica de la variación del factor alfa del Nomograma.

Dada la eficiencia de los equipos a utilizar de 2.8 se elige un factor del nomograma sobre 3 para que los cálculos tengan sentido y no se obtengan demandas negativas (bajo un factor alfa de 2.8 se obtendrían demandas negativas), de acuerdo a la Figura 60 se elige un factor de nomograma de 3,1 con lo que se obtiene una energía calórica de 9000kWh/año.

Con estos nuevos parámetros obtenidos ya es posible calcular la demanda energética que es capaz de suplir un Anclaje alcanzando los siguientes valores mostrados en la Tabla 17:

Tabla 17. Energía y Potencia que suple un Anclaje de acuerdo a la VDI 4640 (II).

Energía [kWh/a]	Potencia [kW]
9000	8,3

Los pasos realizados para la obtención de estos valores se resumen en el análisis gráfico de acuerdo al nomograma general mostrado en la Figura 61.

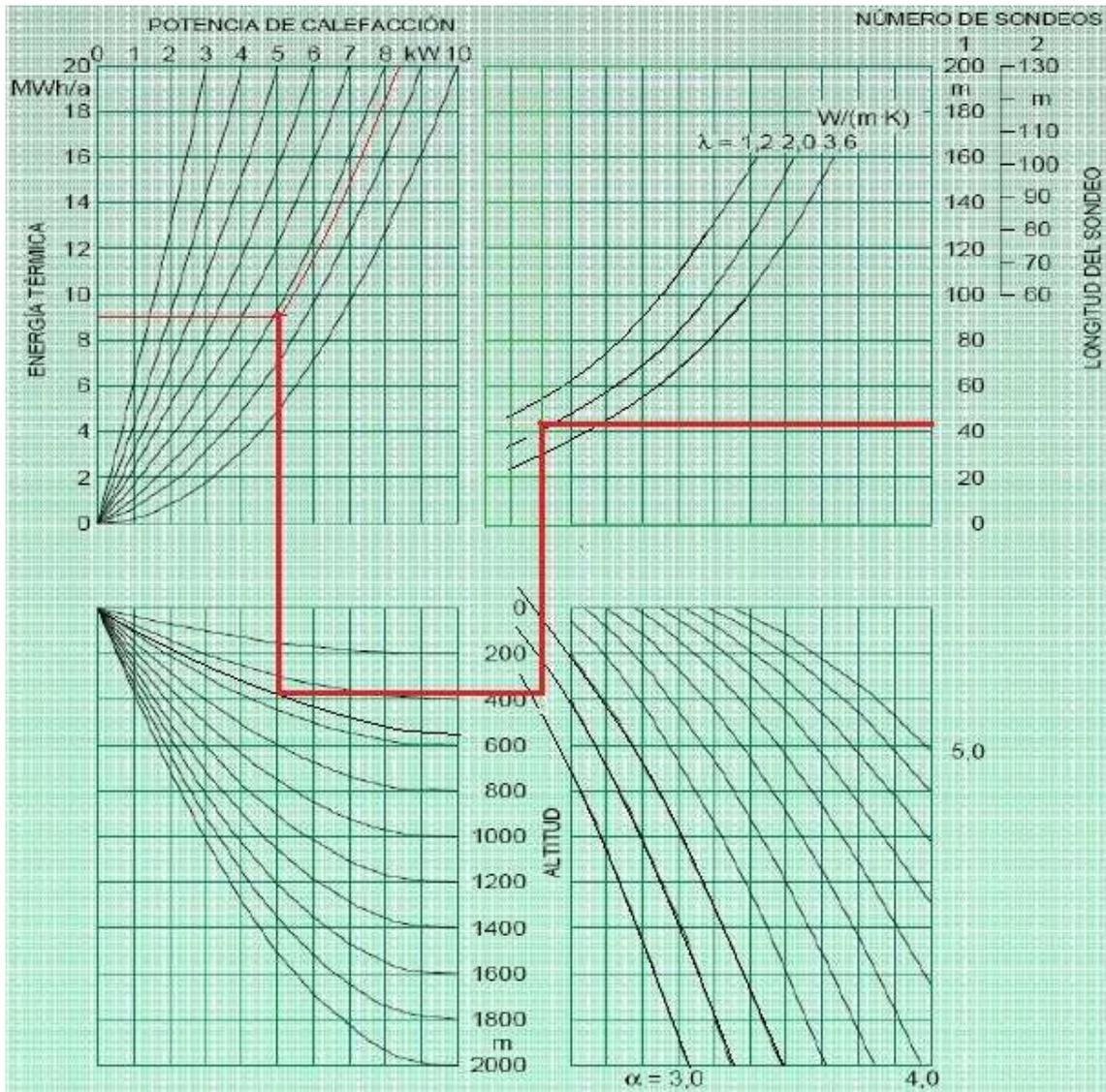


Figura 61. Análisis del alcance térmico de un Anclaje según VDI4640 (II).

La Tabla 18 generada a partir de las Tablas 15¹ y 16² (Capítulo 9.2), donde se analizó la potencia necesaria para satisfacer térmicamente un área en función de sus metros cuadrados, servirá para estimar la demanda térmica que un Anclaje puede satisfacer de acuerdo a la nueva utilización dada al Nomograma (Figura 61). En el caso de los 8,3 kW posibles de generar, se obtiene proporcionalmente un área de 194,3 m² como se observa en la Tabla 19.

Tabla 18. Área posible de satisfacer térmicamente con el uso Anclaje.

Área [m ²]	Potencia [kW]
150 ¹	6,41 ²
Área por Anclaje	
Área [m ²]	Potencia [kW]
194,3	8,3

De acuerdo a los análisis realizados se resume en que con una perforación de 41 m (Anclaje) se logró generar una Potencia basada en la utilización de equipos de bomba de calor y condiciones definidas tanto de horas de uso, tipo de suelo y una altura determinada (ubicación geográfica) que alcanza el valor de 8,3 kW lo que de acuerdo a los cálculos realizados en la Tabla 15 serviría para satisfacer una demanda de un área habitable de 194,3 m².

9.5. Análisis del rendimiento térmico (W/m) de la Pila y Anclajes

En el diseño desarrollado según la VDI4640 a pesar de considerar múltiples variables del problema en estudio y aunque de forma implícita se esté considerando el rendimiento de cada instalación (en términos de W/m) es importante destacar un factor que no ha sido explicado dentro de la norma VDI 4640 y que de acuerdo a los ensayos realizados en terreno en esta investigación ha quedado claro. En las Tablas 9, 10 y 11 se observan los rendimientos obtenidos para distintas condiciones en términos de inyección de calor al suelo.

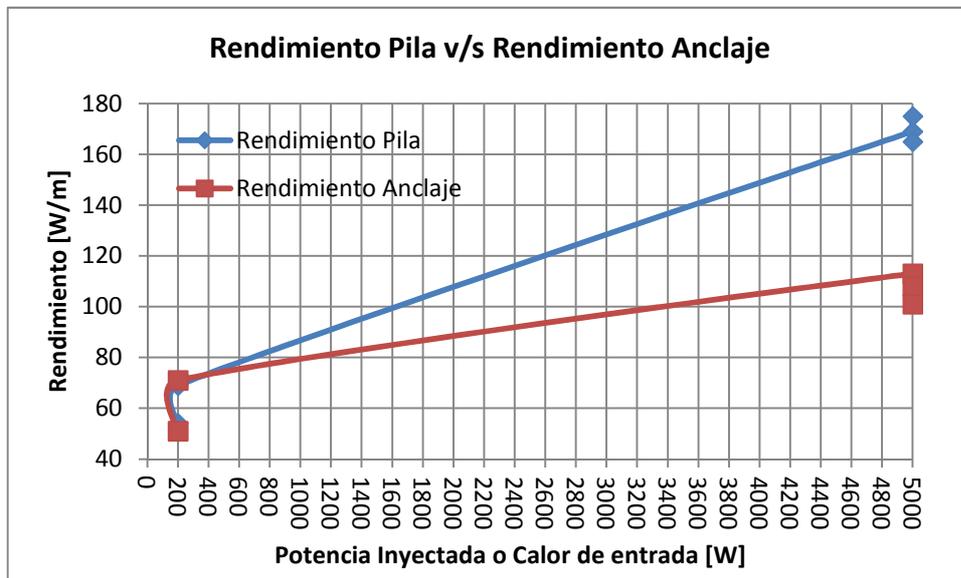


Figura 62. Rendimientos Térmicos en función de la Potencia o Calor inyectada.

La Figura 62 muestra el rendimiento para cada ensayo de acuerdo a la Potencia o calor inyectado al suelo (potencia del calefactor y bomba hidráulica). Tanto para la Pila como para el Anclaje los valores obtenidos son muy similares (cercano a los 50 W/m ambos) lo mismo para otra medición (cercana a los 70 W/m ambos), pero a medida que el calor inyectado aumenta (se enciende el calefactor) los rendimientos dejan de ser similares, y comienzan a cambiar la tendencia alcanzando en la medición con el calefactor encendido una diferencia entre el rendimiento de la Pila y el Anclaje de 70 W/m (Pila 170 W/m y Anclaje 101 W/m). Esta diferencia encontrada se asocia directamente a la dimensión de las instalaciones, la Pila por su geometría y gran envergadura permite retardar más la llegada del calor al suelo por lo cual para una gran inyección de calor sigue funcionando y transmitiendo el calor a sus

alrededores, pero en el caso del Anclaje se observa que a medida que se aumenta este ingreso de calor no es capaz de aumentar su rendimiento como lo logra hacer la Pila.

Esta importante característica es fundamental a la hora de trabajar con altas temperaturas como en el caso de procesos industriales, donde el agua se usa como medio de enfriamiento tanto para equipos como procesos. Por lo cual el uso del Anclaje sería menos competente a la hora de introducir esta implementación en el área industrial.

9.6. Anclaje inclinado y su comportamiento como sondaje vertical

Como ya se ha mostrado en la Figura 61 y de acuerdo a las mediciones realizadas en esta investigación existen condiciones en las que el comportamiento térmico de la Pila y de los Anclajes es muy similar. Esta información permite en cierto modo y tomando como principales supuestos que el Anclaje implementado funciona como un sondaje vertical, a pesar de que las tuberías no estén embebidas en el suelo (pero si en un medio estudiado) y que además existan condiciones de borde que pueden influir en el bulbo de temperaturas, poder considerar que el Anclaje hasta cierto nivel de inyección de calor funcionará como un sondaje de forma vertical en contacto con el suelo (como la Pila), para entender esto es importante recordar que el rendimiento térmico depende directamente de las propiedades del suelo o medio que rodean a las tuberías, ya que éste es el principal supuesto teórico de la teoría de Ingersoll & Plass (1948), sumado al supuesto de la fuente lineal de calor. Esta consideración entrega un primer fundamento para poder comparar el comportamiento térmico de la Pila y los Anclajes, evitando considerar que cada rama del Anclaje se ubica en un tramo de suelo distinto (máximo 7 metros verticales por rama) en que las variaciones de temperatura no son comparables a un sondaje vertical completo (30 metros en nuestro caso, o más), de acuerdo a esto el suponer que las 3 ramas de los Anclajes equivalen a la superposición de ramas pero de forma vertical (ver Figura 63), es una primera aproximación que permite suponer que aplicar las ecuaciones de Ingersoll & Plass al caso Anclajes es posible.

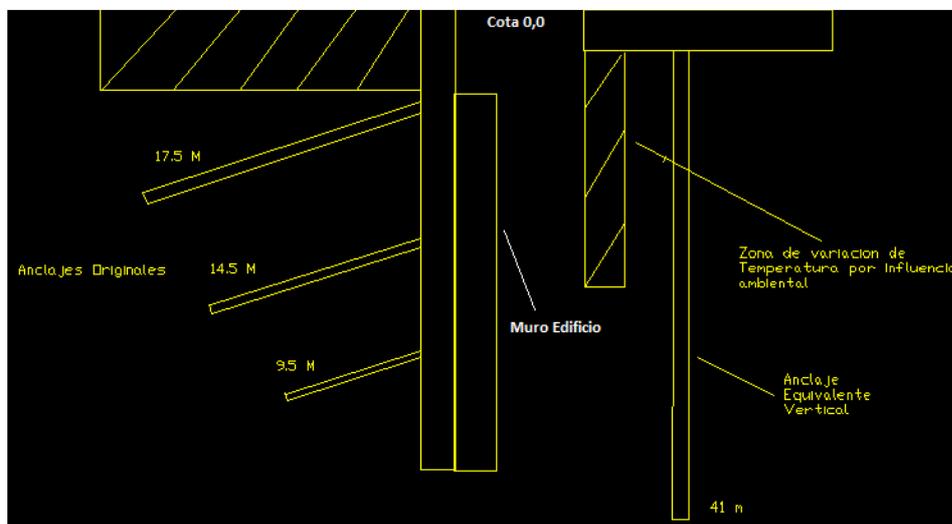


Figura 63. Anclajes Inclinados y su Equivalencia como sondaje vertical.

Un análisis muy importante saldrá de encontrar hasta que nivel de inyección de calor hacia el interior del Anclaje y la Pila estas tienen un comportamiento térmico similar, ya que hoy en esta investigación solo se cuenta con dos puntos del gráfico con lo que no es posible obtener la información para conocer la respuesta a la pregunta planteada. En la Figura 64 se muestra el punto de interés buscado.

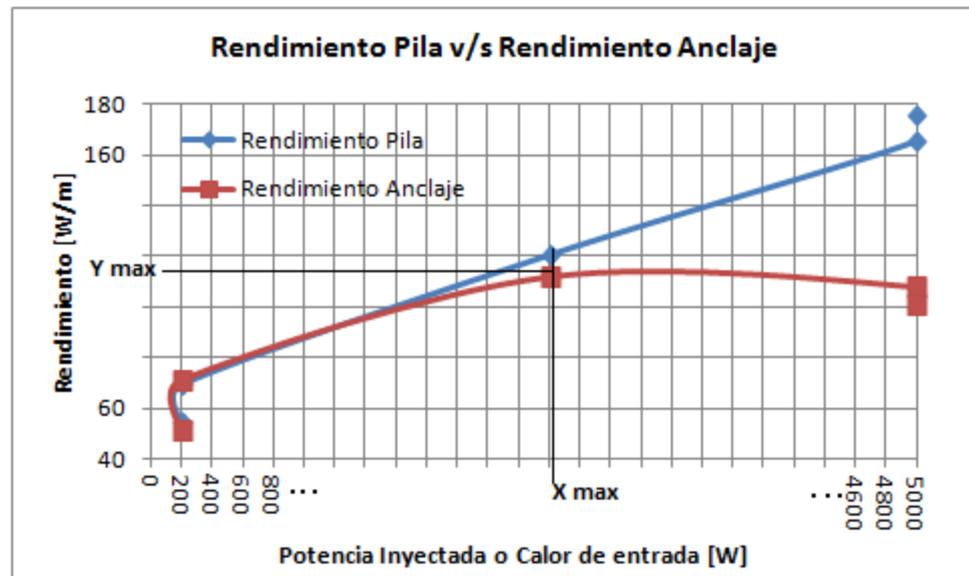


Figura 64. Máximos valores en que Anclaje y Pila tienen mismo comportamiento térmico (Desconocidos).

Una vez conocido los valores tanto de X_{max} como de Y_{max} observados en la Figura 64 y de acuerdo a la demanda energética del área requerida en cuestión se podrá decidir la conveniencia ya sea del uso de Anclajes o Pilas, de acuerdo a los costos asociados a la instalación.

En resumen de acuerdo a lo analizado en este capítulo acerca de cómo dimensionar una instalación geotérmica, se conocen en la actualidad programas computacionales como el EED (www.buildingphysics.com) para el diseño de instalaciones y COMSOL (www.comsol.com) para la modelación, que utilizan una simulación en el tiempo, a largo y corto plazo, como también las ecuaciones de modelación de transferencia de calor, en el caso de esta investigación se ha utilizado el Nomograma de la norma Alemana VDI 4640 que grafica al menos 6 variables del problema para relacionar tanto dimensión, demanda térmica, conductividad térmica del medio y número de perforaciones entre otros para una modelación más acertada del problema.

En el caso estudiado se analizó el problema comenzando por una demanda inicial basada en las dimensiones de un área fija de 400 m^2 , para finalmente obtener la longitud necesaria de las perforaciones para suplir la demanda energética, en este caso se llegó a que se necesitaría de $18,3 \text{ kW}$ de potencia y de $32,23 \text{ MWh/año}$ de energía térmica (gasto) y que esto se supliría con 4 Pilas implementadas o 100 m de Sondajes.

En el segundo caso estudiado se comenzó por suponer una longitud real (41 metros una perforación) para luego continuar con las variables del nomograma y encontrar la posible demanda a suplir con esta implementación.

Basado en los resultados del segundo caso se buscará comparar estos valores finales con sus similares de acuerdo a los distintas metodologías que se han utilizado, ya sea amplificando valores o aumentando el número de perforaciones para alcanzar longitudes similares. De

acuerdo a esto si se determinó que una perforación de este calibre lograba suplir la necesidad de 8.3 kW, es posible generar los siguientes razonamientos.

En el primer diseño (Pila) se obtuvo finalmente que una Pila implementada es capaz de generar una Potencia de 4,58 kW, alcanzando a abastecer un área de 100 m². En el segundo diseño (Anclaje) se calculó que es posible alcanzar una Potencia de 8,3 kW con una perforación de 41 m (sumado a otras condiciones como un equipo de bomba de calor de alta eficiencia, un medio con una conductividad térmica de 1,7 W/mK)

Por otro lado se observa un problema de inconsistencia que aparece al observar las tablas 10 y 11 del capítulo 8 en que los rendimientos alcanzados en términos de rechazo de calor llegaban a los 100 W/m en el Anclaje y 150 W/m en la Pila, esto considerando que se tenían variaciones de temperatura entre entrada y salida de 15° C por lo cual era un caso alejado de la realidad de un área habitable promedio en la que solo se buscará generar con una implementación geotérmica que alcance variaciones de temperatura de hasta 5°C, a pesar de esto si se utiliza esta tasa de rechazo y el largo original de 41 m y 30 m respectivamente solo se alcanzaría una potencia promedio de 4,1 kW para el Anclaje y 4,5 kW en la Pila. En el caso de la Pila el resultado es excelente pues se llega exactamente al mismo valor que el encontrado de acuerdo al Nomograma, pero para el caso del Anclaje existen grandes diferencias entre lo esperado teóricamente y lo alcanzado en la realidad. Para poder cuadrar los resultados de acuerdo a todos los análisis realizados bastaría multiplicar la potencia alcanzada del Anclaje por un factor de 0.5 para obtener el valor real de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación (estimados con TRT). A modo de ejemplo, si utilizamos un largo 41 m de perforación y se llega de acuerdo al segundo método (Nomograma inverso) a una potencia P igual a 8.3 kW, en realidad de acuerdo a las mediciones realizadas con el TRT en esta investigación la implementación solo rinde 4.1 kW por lo que necesitaríamos reducir esa potencia P estimada a solo $\frac{P}{2}$ manteniendo el mismo largo inicial L (utilizando ahí el factor de reducción de 0.5).

10. ESTADO DEL ARTE EN DISEÑO DE PILAS ENERGÉTICAS

La experiencia en diseño de instalaciones geotérmica hoy en día ha alcanzado un gran desarrollo tanto práctico (Terreno) como computacional, logrando incorporar al diseño variables que sin el aporte de las investigaciones actuales no estarían siendo controladas y que juegan un factor fundamental en el diseño a largo plazo, o vida útil del producto (Pilas energéticas). Esta variable es la cantidad de horas o la cuantificación de calor máximo inyectable o extraíble hacia o desde el suelo a las instalaciones por cada año de funcionamiento. El efecto del control de esta variable que restringirá el uso de una instalación geotérmica ha sido estudiado tanto para el funcionamiento a largo plazo como a corto plazo (Jalaluddin, 2010) dónde se demuestra que el suelo es capaz de almacenar calor y alterar su temperatura y desgastar sus propiedades en las cercanías de la instalación si el calor inyectado es muy intenso. En términos didácticos, el suelo tiene “memoria”, en los dos casos posibles (extracción o rechazo de calor), por este motivo es que hoy en día los modelos computacionales necesitan incluir en el dimensionamiento cuantas horas se utilizará el suelo por año.

Lo positivo del calentamiento o enfriamiento del suelo aparece al momento de un cambio de estación (verano a invierno), ya que en este periodo de transición el rendimiento térmico del suelo podría verse mejorado al estar “cargado” de este calor que ha sido inyectado durante un periodo de extracción de calor al agua para enfriarla, y así comenzar la nueva etapa de funcionamiento (obtención de calor desde el suelo) con mejores condiciones y propiedades térmicas, ver Figura 65.



Figura 65. Inyección y extracción de calor en el suelo de un proyecto geotérmico. Wagner (2012, 7)

En la actualidad el diseño de instalaciones geotérmicas debe incluir tanto el diseño geotécnico, ingenieril como geotérmico. El éxito del proyecto está directamente relacionado con el trabajo en conjunto de cada una de las especialidades. En la Figura 66 se muestran las responsabilidades de cada parte con la finalidad de obtener un diseño correcto.

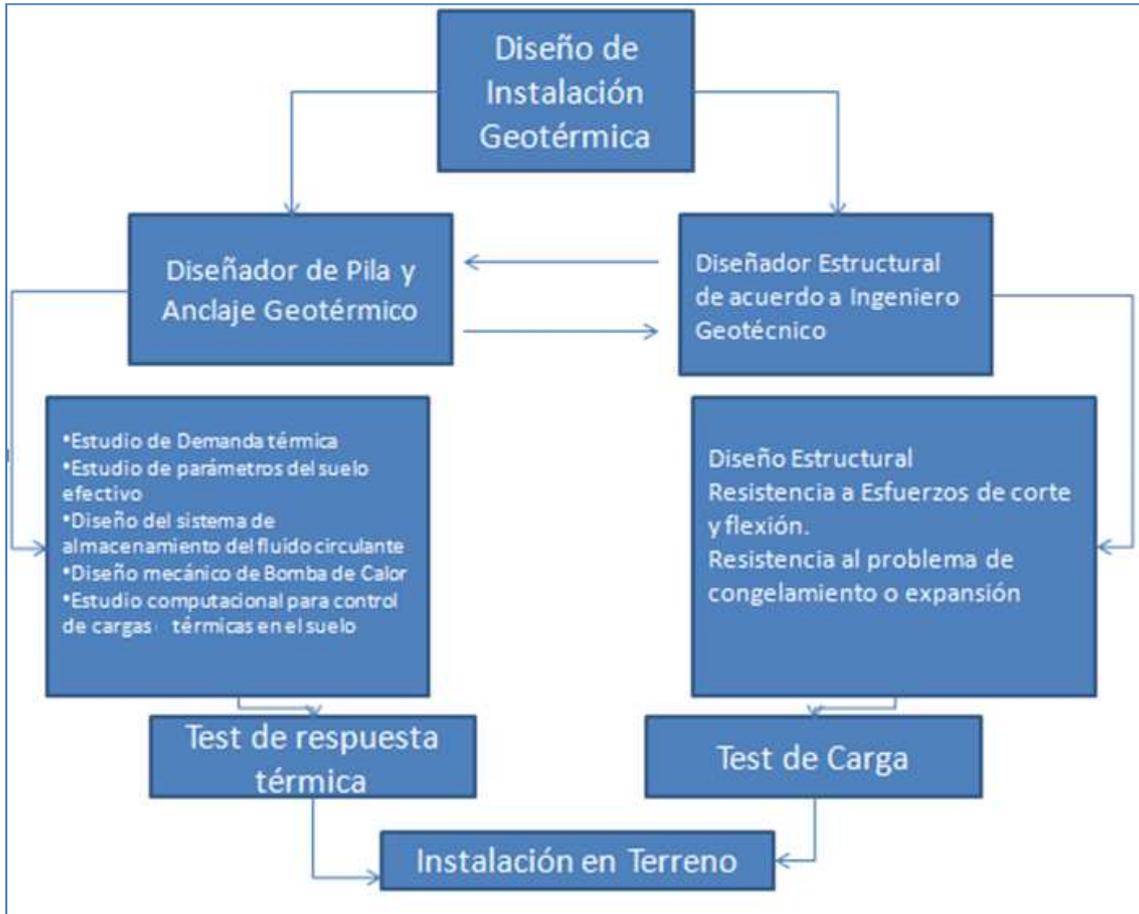


Figura 66. Responsabilidades del diseñador de una Pila Geotérmica

En la actualidad hay más de 20 países que han normado el diseño e instalación de sistemas geotérmicos, a pesar de esto hoy en día no existe un “manual” de diseño de Pilas o Anclajes geotérmicos, solo consideraciones y normas de calidad que tienen como finalidad optimizar tanto el funcionamiento como la disposición de estos en terreno abarcando tanto detalles constructivos, de diseño y otros de instalación.

Para finalizar en la Tabla 19 se muestra una compilación de los ítems considerados más importantes en las normas internacionales de acuerdo a Wagner (2012, 7) en el último congreso de aplicaciones energéticas con uso de geotermia. Las normas mencionadas se enuncian a continuación.

- Alemania: VDI 4640
- Austria: OWAV-Regelblatt 207
- Francia: NF X 10-970 + GT
- Suiza: SIA 384-6

Tabla 19. Resumen de consideraciones de diseño de Instalaciones geotérmicas

País	Métodos
Alemania	30 kW solo Calefacción Cálculo en base a Rendimiento y parámetros (W/m) Calcular cargas térmicas y radio de influencia Evaluación del sistema a largo plazo 5 metros de separación
Austria	Perforación piloto Aplicar TRT en terreno Nunca menor a 5 m de separación
Francia	Diseño por Oficina de estudios especializada
Suiza	Cálculos sencillos de estimación Diseño detallado

A modo de conclusión, una implementación geotérmica tiene una gran funcionalidad y destacadas características que la encaminan como un método de aprovechamiento energético directo. La principal barrera en la actualidad es que como la mayoría de las innovaciones, solo ha sido aplicada en países de alto desarrollo tecnológico e investigativo. Como se aprecia en la tabla 16 solo países primer mundistas cuentan con normas de calidad o diseño de aplicaciones geotérmicas, normas que aseguran un buen funcionamiento y durabilidad, documentos que se podrían generar con investigaciones de ésta índole. Pero también hay que saber aprovechar y utilizar los conocimientos ya adquiridos por países potencia en tecnología, por lo que es importante nunca comenzar una carrera desde 0, aprender de los errores de quien ya han intentado experiencias similares como es el caso de Alemania, Turquía y Suiza. En la actualidad China se encuentra desarrollando investigación vanguardista en el aprovechamiento geotérmico en Pilas de entibación (Gao et al., 2007).

11. CONCLUSIONES

El desconocimiento que existe en el estudio del comportamiento térmico del suelo como también en el diseño de un proyecto de geotermia de baja entalpía es el principal desafío a superar para lograr avances significativos. Por otro lado el desarrollo de la memoria permitió abrir nuevas líneas de investigación asociadas a la geotermia de baja entalpía tanto en el área Civil, como en el área Hidráulica y Geotécnica. Durante el desarrollo se logró identificar lo crucial que es contar con un equipo de trabajo multidisciplinario con el que se puedan ir resolviendo las dudas del día a día. Los conocimientos acabados que existen en la actualidad apuntan en su mayoría al desarrollo de Borehole Heat Exchanger, que a pesar de tener una gran similitud con nuestro caso de Anclajes, cuenta con innumerables otras variables que se deben considerar a lo largo de todo su procesos de ciclo de vida. Durante el desarrollo de la memoria se logró abordar las recomendaciones propuestas por Muñoz (2011) que apuntan a mejorar el equipo TRT para lograr obtener mejor y mayor información acerca del comportamiento y rendimiento térmico de las Pilas y Anclajes energéticos.

El desarrollo de la memoria fue exitoso, logrando comprender casi plenamente el comportamiento térmico de las instalaciones y obteniendo los parámetros básicos para poder pensar en un diseño

Comportamiento térmico de Pila y Anclaje

Previo al análisis del comportamiento térmico de acuerdo a los gráficos mostrados, es importante recordar las dimensiones y las condiciones de cada instalación en terreno ya que por ejemplo el Anclaje representa de mejor manera un sondaje original (Borehole con tuberías embebidas en suelo), en comparación con la Pila que cuenta con un mayor diámetro de material distinto al suelo (Hormigón) y no recubierta en su totalidad.

De acuerdo a las mediciones dinámicas representadas por las Figuras 28, 29 y 30 se observa que durante el verano, periodo en que las Pilas estaban en un 50 % expuestos a condiciones ambientales, las variaciones de temperatura interna fluctuaban de manera directa con las fluctuaciones de temperatura ambiental, por lo cual en el caso de las Pilas, su exposición directa al sol tendría una influencia importante en los resultados esperados, por otro lado los Anclajes tenían solo las cabezas de los sensores y las conexiones en serie expuestos a condiciones ambientales, por este motivo se ve que la variación de temperatura en el interior es más atenuada que el caso de las Pilas.

Este comportamiento se ve corroborado perfectamente con las mediciones estáticas, representadas por las Figuras 31, 32 y 33, en los cuales se analizó la temperatura interna a una hora puntual, obteniendo en el caso de las Pilas curvas de incremento de temperatura para los periodos del día en que la temperatura ambiente incrementaba, al contrario del Anclaje donde se observa que la temperatura de éste se mantiene casi constante durante todo el día, alcanzando los 21 grados en promedio.

El comportamiento influenciado por la exposición a condiciones ambientales cambiará de modo drástico una vez el muro perimetral alcance la cota 0,0 del proyecto, alterando el funcionamiento estudiado en los meses de verano, mejorando la tasa de rechazo o ganancia de calor ya que no existirá una fuente de calor externa como el sol durante el día ni el frío directo durante la noche sobre las tuberías que quedaron expuestas en las mediciones realizadas durante la construcción del edificio.

Rendimiento energético de Pilas y Anclajes

Los valores finales de rendimiento térmico para el Anclaje fue de 4,1 kW de Potencia y para la Pila de 4,5 kW de Potencia, esto es en cierto modo consecuente con pesar de que la Conductividad térmica efectiva del Anclaje superara al de la Pila (Anclaje 1,7 W/mK, Pila 1,6 W/mK), pero los volúmenes de agua posible de recircular son claramente mayores en la implementación de la Pila.

El haber realizado las mediciones con el test de respuesta térmica y haber logrado definir parámetros con gran precisión y concordantes con lo esperado de acuerdo a los materiales utilizados fue un éxito, pues los valores obtenidos fueron siempre cercanos a los valores de la conductividad térmica ya estudiada del Hormigón, viendo mejoras aunque sólo en un decimal (1.71 W/m/K) para el caso del Anclaje que cuenta con una cobertura de lechada y no hormigón.

Un punto crucial fue el utilizar los datos registrados sin la utilización del calefactor, sino solo considerado el aporte térmico de la bomba hidráulica, pues esto significó trabajar con el agua a temperaturas en condición real de funcionamiento (cercano a los 30 grados de entrada), y al no utilizar el Calefactor se pudo utilizar el Bypass del TRT por lo cual el caudal de circulación utilizado (12 L/m) es mucho más cercano a los caudales que se usan en condiciones de funcionamiento de sistemas de geotermia con bomba de calor. Esta medición demostró que tanto la Pila como el Anclaje alcanzan fácilmente los rendimientos mínimos para utilizar instalaciones con potencial geotérmico (60 W/m).

Las mediciones realizadas con el uso del calefactor también sirven para demostrar una funcionalidad de carácter industrial de estas instalaciones, pues podría darse el caso de no querer calefaccionar una zona sino más bien lograr hacer descender altas temperaturas de trabajo (60°C) en procesos de producción u otros. O sea el medio en que se trabajó (Suelo – Hormigón o Suelo-Lechada) permiten ya sea obtener tasas desde los 50 W/m hasta los 150 W/m (valor que en la realidad serían insostenible para un suelo ya que con esta tasa de rechazo se aceleraría la capacidad del suelo degradando sus propiedades a mediano plazo). Los valores que se obtuvieron para el caso de circulación a 5 L/min con el calefactor encendido salen del rango de respuesta térmica del suelo que se podría esperar, ya que en un funcionamiento normal no se espera que el suelo haga descender 15 °C el volumen circulante de agua, motivo por el cual se obtiene una tasa de rechazo tan alta. Para el objetivo de este tipo de instalaciones un delta de temperatura de 5 °C ya es un gran aporte en términos económicos.

En este caso será crucial el estudio a largo plazo de la inercia térmica del suelo, ya que una vez perturbado el suelo durante largos periodos los rendimientos irán decayendo progresivamente. Por lo que se recomienda el estudio a largo plazo mediante algún método computacional. Una herramienta de diseño muy reciente utiliza una aproximación como fuente cilíndrica y es capaz de modelar interacciones entre grupos de sondajes (Borehole) como también es posible modelar instalaciones que no son Boreholes exactamente (Katsura et al., 2006; Nagano et al., 2006)

Anclaje excepción

El Anclaje asociado a la Pila Helicoidal entregó resultados que a simple vista parecen de un suelo con gran potencial de aprovechamiento, ya que se obtuvo una conductividad térmica superior a los 2,2 W/mK. La diferencia entre el Anclaje asociado a la Pila U y el asociado a la Pila helicoidal solo es en términos de separación, pues ya sea tanto geométrica como físicamente son idénticas. Es posible que durante el proceso constructivo las tuberías de un Anclaje pudiesen quedar con mayor contacto con el suelo, pero es una opción poco probable, otra opción para comprender los resultados obtenidos es la aparición de algún flujo de agua durante el periodo de medición. Esta idea parece ser mucho más acertada, debido a la alta permeabilidad del suelo en aquella zona donde se ubica este Anclaje y su cercanía con el baño del personal del proyecto, es importante mencionar que en este proyecto trabajan cientos de personas por lo cual la cantidad de agua que escurre justo por el suelo sobre el Anclaje es considerable. Un último factor a considerar para lograr comprender estos resultados es la fuga de aguas del ducto de aguas servidas ubicado en las cercanías de la instalación, fuga de agua causada al momento de realizar la implementación en los comienzos del proyecto. La influencia a favor en términos de los posibles valores a obtener cuando una instalación cuenta con una napa subterránea o un flujo subterráneo ya está demostrado y está asociada a las corrientes convectivas que se producen en estos casos.

Recomendaciones

El equipo TRT logró parcialmente su objetivo, ya que una vez avanzado el periodo de mediciones se logró descubrir que además de haber existido problemas con la presión de entrada para el correcto funcionamiento, se cuenta con una restricción que necesariamente deberá ser corregida a futuro y esta es que el calefactor cuenta con un termostato que apaga el equipo una vez que este ya calienta el fluido sobre los 60 ° C. Será imprescindible contar con un calefactor que sea capaz de entregar una potencia constante y a la vez de menor magnitud que la que en la actualidad se entrega, esto principalmente para poder simular las condiciones de funcionamiento real de una instalación de climatización. Por otro lado el calefactor deberá permitir trabajar con caudales mayores a los 10 L/m también para poder simular de mejor forma la operación en condiciones reales del sistema.

De acuerdo a los resultados, el sistema que entrega una mejor condición con baja variabilidad en los resultados es el de los Anclajes, pues logran mantener sin importar las condiciones ambientales una temperatura óptima en verano, el único factor por el cual no se puede considerar con toda seguridad que el Anclaje es la mejor opción es el hecho de los diámetros que se pueden lograr introducir en estos son mucho menores a los diámetros utilizados en las Pilas. (Anclajes ϕ 22 mm-Pilas ϕ 32 mm).

Sugerencias de Futuras Investigaciones

- Influencia a largo plazo en el suelo circundante de Pilas y Anclajes geotérmicos mediante inyecciones de calor más prolongadas en el tiempo. Esta inquietud nace en primer lugar por la Potencia con que se trabajó en la investigación (4500 W), forzando al medio de rechazo de calor a quitarle en promedio 15 °C al fluido circulante. Este valor del delta de temperatura tan elevado obliga a cuestionarse hasta que nivel de exigencia el suelo podrá durar un periodo de tiempo rentable para una inversión geotérmica.
- Realizar test de respuesta térmica con mayor caudal que 5 L/m y poder obtener un caudal óptimo para cada instalación. Es sabido que para que la transferencia de calor entre el flujo circulante y el medio sea óptima se requiere tener un flujo turbulento, por lo cual sería necesario obtener para estas dimensiones cual sería la velocidad óptima de circulación para obtener el mejor rendimiento.
- Estudio de Rendimientos térmicos progresivos en función del calor inyectado para determinar el máximo rendimiento en común tanto para Pila como Anclaje Geotérmico
- Mejorar el Calefactor del Equipo TRT tratando de permitir variaciones de potencia y así trabajar en implementaciones de variadas dimensiones. En la investigación se confirmó que la principal restricción para lograr realizar mediciones en distintos tipos de instalaciones (distintas dimensiones y profundidades) es necesario controlar la potencia de inyección de calor, por lo que será fundamental lograr controlar esta variable ya sea con un variador de frecuencia o una serie de calefactores comunicados.
- Estudiar viabilidad de aplicación de Pilas geotérmicas para Procesos Industriales. El área industrial sería un campo interesante por abordar, pero dado los volúmenes de aguas que se manejan en los procesos, sería necesario en primer lugar estimar si una instalación geotérmica sería capaz de albergar grandes cantidades (volúmenes de fluido circulante) y a la vez que el ahorro energético sea comparable con la inversión, pues hoy en día el objetivo de estas implementaciones es alcanzar variaciones del orden de 5 grados Celsius y funcionar como apoyo de equipos mecánicos, ya que no es fácil encontrar suelos o medios con buenas propiedades térmicas como Conductividad térmica mayor a 3 W/mK. (Ejemplo: Industria del Chocolate, requiere enfriar diariamente grandes volúmenes de agua de 60 grados a 10 grados Celsius para sus procesos de producción

Ingeniería Sustentable

En el marco de la Ingeniería sustentable es dónde investigaciones como ésta buscan el desarrollo de conocimiento y la obtención de experiencia en temas vanguardistas. La oportunidad de crear nuevos conocimientos hoy en día es de una alta complejidad y su desarrollo va de la mano tanto con las inversiones en investigación y desarrollo como con la necesidad de contar con profesionales que lideren equipos como con estudiantes capaces de solucionar la infinidad de problemáticas teóricas y prácticas que aparecen en el día a día del estudio científico. La investigación desarrollada en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile (Muñoz, 2011 y la presente) abre puertas a la inmersión en un tema que aparentemente hoy en día Chile debiese abordarse con mayor apuro y precisión, pues se habla de que Chile cuenta con un potencial geotérmico envidiable a nivel mundial, es por esto que todo aporte en conocimiento de la Ingeniería relacionado a la geotermia podrá ser utilizado en el futuro.

12. REFERENCIAS

Chiasson, A., 2010. Pitfalls of Rules of Thumbs in Geothermal Heat Pump Design. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Dayton. USA.

Cullin, J., Spitler, J., 2011. A computationally efficient hybrid time step methodology for simulation of ground heat exchangers. *Geothermics* 40, 144-156. USA.

Cullin, J., Splitter, J., 2008. Misconceptions Regarding Design of Ground-source Heat Pump Systems. Proceedings of the World Renewable Energy Congress, July 20-25, Glasgow, Scotland.

De Moel, M., Bach, P., Bouazza, A., Singh, R.M., Sun, J., 2010. Technological advances and applications of geothermal Energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2638-2696. Australia.

Ericsson, L., 1985. Heat Exchange between crystalline Bedrock and borehole in an energy wall system. PhD. thesis. Chalmers University of Technology and University of Goteborg, Department of Geology, Sweden.

Franco, A., Toledo, M., Moffat, R., Herrera, P., 2012. Modelación numérica de un sistema experimental de pilotes geotérmicos implementado en el nuevo edificio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile. Tesis de Magister. Chile, In press.

Fischer, M. (2006). "Formalizing Construction Knowledge for Concurrent Performance based Design." 13th EG-ICE Workshop: Intelligent Computing in Engineering and Architecture, Ascona, Switzerland, 25-30 June, 186-205

Gao, J., Zang, X., 2007. Thermal Performance and ground Temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. Tongji University. Shanghai.

Georgiev, A., Tabakova, S., Popov, R., 2010. The Bulgarian Experience in the Thermal Response Test. Department of Mechanics, Technical University of Sofia, Bulgaria, 2010

Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., Ochifiju, K., 2007. Field Performance of an Energy Pile System for Space Heating. *Energy and Building* 39, 517-524. Japan.

Ingersoll, L.R., Plass, H.J., 1948. Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump. *ASHVE*; 119-122. USA.

Jalaluddin, J., Miyara, A., Tsubaki, K., Yoshida, K., 2010. Thermal Performance of Three Type of Ground Heat Exchangers In Short-Time Period of Operation. School of Mechanical Engineering, Purdue University.

Laloui,L. Peron,H. Knewllwolf,C ., 2011. A Method for the geotechnical design of a heat exchanger piles. Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.

Lund,J. Freeston,D. Boyd,T., 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. Geo-Heat Center. Oregon Institute of Technology, USA.

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.

Norma de Reglamentación térmica, 2006. Artículo 4.1.10, Chile.

Sanner,B. Hellstrom,G. Gehlin,S., 2005. Thermal Response Test Current Status and World-Wide Application.Lund Institute of Technology, Sweden.

Serrano,J., 2012. Curso y Cálculo de Instalaciones con Energía Geotérmica. Universidad de Castilla la Mancha. No publicada.

Sevilla, C., 2009. Elementos Constructivos, Marsay Ediciones.

Signhild,G., 2002. Thermal Response Test, Method Development and Evaluation. Master thesis. Lulea University. Suecia.

Cui, P. Yang,H. Fang, Z., 2008. Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined Boreholes. Applied Thermal Engineering 28, 2295-2304. China.

PNUMA, 2010. Informe Anual Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente. Dirección de Promoción y Relaciones Externas. Nueva York.

Zeng,H.Y. Diao, N.R. Fang, Z., 2002. A finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. Shandong Institute of Architecture and Engineering, China. Heat Pump Research Center. 2002

Wagner,I. Katzenbach,R. Clauss,F., 2012 Análisis comparativo de normas Europeas existentes sobre sondas geotérmicas. III Congreso de Energía geotérmica. Madrid.