

TABLA DE CONTENIDO

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

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

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

ÍNDICE DE TABLAS

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

ÍNDICE DE FIGURAS

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

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