



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de metodologías analíticas para la
determinación del cambio de temperatura
representativo para el diseño termo-mecánico
de pilas de energía**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Daniel Augusto Alarcon Pedraza

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Norma Patricia López Acosta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Agustín Demeneghi Colina
Secretario: M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose
Vocal: Dra. Norma Patricia López Acosta
1^{er} . Suplente: Dr. Walter Iván Paniagua Zavala
2^{do} . Suplente: M.I. Verónica Flores García

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA DE TESIS

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Norma Patricia López Acosta', is written over a solid horizontal line.

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme a lo largo de toda mi trayectoria.

A mi madre, Rosa, por su trabajo, sacrificio, dedicación, educación, apoyo y confianza que me ha dado incondicionalmente durante cada etapa de mi vida. Gracias por iluminar mis días y embellecer mi vida con tu amor.

A mi familia por brindarme todo su apoyo.

A Santiago Basilio por brindarme su apoyo incondicional y acompañarme a lo largo de toda mi trayectoria universitaria. Gracias por darme la mano y ayudarme a levantarme siempre.

A mis amigos Aracely Gómez, Carlos Huerta, Brandon Cruz y Alejandro González por brindarme su apoyo y amistad desde el principio, por confiar en mí y acompañarme a lo largo de toda la carrera. Gracias, Carlos, por tus palabras de aliento, tu orientación y conocimientos.

A la Dra. Norma Patricia López Acosta por darme la oportunidad, confianza, orientación, dedicación y el apoyo para realizar este trabajo. Gracias por ayudarme a crecer.

A la universidad y al Instituto de Ingeniería UNAM por brindarme todo el apoyo necesario y la educación para convertirme en un profesionista.

A Viviana Cruz, David Barba y Kitzia Arizmendi por brindarme su apoyo, orientación y todo su conocimiento para la realización de esta tesis. Gracias por su paciencia y amabilidad.

A los sinodales M.I. Agustín Demeneghi Colina, Dr. Walter Iván Paniagua Zavala, M.I. Verónica Flores García, M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por su apoyo en la revisión de este trabajo.

A mis compañeros tesisistas del Instituto de Ingeniería UNAM por acompañarme, aconsejarme y brindarme experiencias profesionales durante mi estancia en el instituto.

A todos los maestros de la Facultad de Ingeniería por darme educación, consejos y orientación de vida, por su labor como docente, por darme sus conocimientos y las herramientas necesarias para trabajar profesionalmente. Gracias, maestra Amalia Cafaggi, por su educación, apoyo, comprensión y humanidad para ayudarme cuando lo necesitaba.

A la maestra Sixta Mendoza por todo su apoyo, orientación, educación, tiempo, amabilidad y conocimientos compartidos en la carrera. Gracias por darme un valor agregado y ayudarme a crecer profesionalmente.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería con quienes compartí momentos durante la carrera, por acompañarme, apoyarme, ayudarme y brindarme las mejores experiencias recreativas y profesionales durante la carrera y hasta la culminación de este trabajo. Zeus, Andrea, Jorge, Alonso, Fernando, los Reales, Arturo gracias por su cariño y admiración.

Evaluación de metodologías analíticas para la determinación del cambio de temperatura representativo para el diseño termo-mecánico de pilas de energía

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	5
1.1 Energía y sistemas geotérmicos.....	5
1.2 Bomba de calor.....	7
1.2.1 Componentes del sistema de intercambio de calor.....	8
1.3 Estructuras termoactivas y pilas de energía.....	9
1.4 Comportamiento termo-mecánico de pilas de energía	11
1.4.1 Deformaciones y esfuerzos térmicos en pilas de energía	15
1.5 Métodos de análisis de pilas de energía.....	18
1.5.1 Análisis desacoplado de pilas de energía con métodos de transferencia de cargas termo-mecánicas	19
1.6 Consideraciones para el análisis térmico de pilas de energía	22
1.7 Diseño termo-mecánico de las pilas de energía.....	25
2 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA	29
2.1 Modelos analíticos para el análisis de la respuesta térmica de pilas de energía... 29	29
2.1.1 Modelo de fuente lineal finita (FLSM)	32
2.2 Modelos para la determinación de los cambios de temperatura representativos en pilas de energía	34
2.2.1 Análisis del impacto de la resistencia térmica del concreto en el cambio de temperatura representativo de pilas de energía.....	42
2.3 Método de transferencia de carga para la revisión del comportamiento termo-mecánico de pilas de energía	43
3 EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA REPRESENTATIVOS EN PILAS DE ENERGÍA	51

3.1	Caso 1. Pila de energía con tubería en espiral	53
3.1.1	Análisis de resultados	55
3.2	Caso 2. APGE Piles	58
3.2.1	Análisis de resultados	59
3.3	Caso 3. US Air Force Academy	61
3.3.1	Análisis de resultados	63
3.4	Caso 4. Respuesta térmica en una pila de energía instrumentada con celdas Osterberg	64
3.4.1	Análisis de resultados	67
3.5	Análisis del comportamiento termo-mecánico a corto plazo	71
3.6	Análisis y resumen de resultados de la evaluación al método analítico para la obtención de los cambios de temperatura representativos para el diseño termo-mecánico de pilas de energía	77
4	CASO DE ESTUDIO: RESIDENCIA C73.....	79
4.1	Diseño térmico.....	80
4.2	Cálculo de los cambios de temperatura representativos de la pila de energía.....	81
4.2.1	Geometría y propiedades térmicas de las pilas de energía y del suelo.....	82
4.2.2	Resultados de respuesta térmica de la pila de energía.....	84
4.3	Diseño geotécnico.....	86
4.3.1	Propiedades y características del suelo y de la pila	86
4.3.2	Cargas aplicadas	89
4.3.3	Estado límite de falla	91
4.3.4	Estado límite de servicio.....	93
4.4	Diseño estructural.....	95
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.1	Conclusiones.....	97
5.2	Recomendaciones	100
	REFERENCIAS	103
	ANEXO I. CALIBRACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO PARA EL CÁLCULO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA REPRESENTATIVO PARA EL DISEÑO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA	111
	ANEXO II. CÓDIGO <i>RTEMP</i> PARA EL CÁLCULO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA REPRESENTATIVO PARA EL DISEÑO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes principales de las bombas de calor (adaptado de Sarbu y Sebarchievici, 2014).....	8
Figura 1.2 Esquema general del sistema de intercambio de calor (adaptado de Brandl, 2006)	9
Figura 1.3 Principales configuraciones geométricas de tubería vertical para pilas de energía (adaptado de Mohamad <i>et al.</i> , 2021).....	10
Figura 1.4 Esquema termo-mecánico de una pila de energía sin restricción en la cabeza ni en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)	13
Figura 1.5 Esquema termo-mecánico de una pila de energía con restricción en la cabeza o en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)	14
Figura 1.6 Esquema termo-mecánico de una pila de energía con restricción en la cabeza y en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)	15
Figura 1.7 Dos dominios del comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía: a) Vista general de la pila y el suelo, b) Cambio de temperatura que ocurre en el corte transversal A-A, c) Deformaciones térmicas libres debidas al cambio de temperatura en b), d) Deformaciones internamente bloqueadas y deformaciones térmicas observadas en una pila libre, e) Deformaciones restringidas y deformaciones observadas en una pila embebida en el suelo (adaptado de Abdelaziz y Ozudogru, 2016a)	17
Figura 1.8 Curvas de transferencia de carga: a) evolución de la resistencia a la fricción movilizada (t_s) respecto al desplazamiento de la pila, b) evolución de la reacción en la base movilizada (t_b) respecto al desplazamiento de la pila (adaptado de Knellwolf <i>et al.</i> , 2011)	20
Figura 1.9 Modelo de diferencias finitas para una pila de energía: a) modelo para la carga mecánica y b) modelo para la carga térmica. Para ambos incisos z_i es desplazamiento del segmento i de la pila (adaptado de Knellwolf <i>et al.</i> , 2011)	21
Figura 1.10 Interacciones entre el proceso de diseño geotécnico y térmico (adaptado de Bourne-Webb <i>et al.</i> , 2016).....	26
Figura 2.1 Geometría del sistema de fuente de línea finita (adaptado de Zeng <i>et al.</i> , 2002)	33
Figura 2.2 Tres dominios acoplados en el desempeño de la pila: a) diagrama general de la pila de energía, b) cambio de temperatura para la sección transversal de la pila, c) deformación térmica libre de la sección, d) deformaciones térmicas promedio, e) deformaciones restringidas y observadas (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022)	36

Figura 2.3 Superposición por partes escalonadas linealmente de las entradas de calor en el tiempo (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022).....	37
Figura 2.4 a) configuración real de la tubería de intercambio de calor en la pila, b) configuración en diámetro equivalente y c) proceso de transferencia de calor bajo un dominio (1-D) en la sección transversal de la pila (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022).....	39
Figura 2.5 Diagrama de flujo del modelo para el cálculo del cambio de temperatura representativo de diseño de la pila de energía (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022).....	40
Figura 2.6 Comparación de la resistencia térmica del concreto para diferente diámetro de pila y diferente número de tubos de intercambio de calor en su interior (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022).....	43
Figura 2.7 Elemento discretizado i del modelo de transferencia de cargas mecánico. t_s, i es la fricción movilizada en el fuste (adaptado de Knellwolf <i>et al.</i> , 2011; Amatya <i>et al.</i> , 2012)	44
Figura 3.1 a) Esquema longitudinal y b) corte transversal de la pila de energía hecha <i>in-situ</i> , c) corte transversal de pila en U-Serie y d) corte transversal de pila en U-Paralelo modeladas en COMSOL (adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2020)	54
Figura 3.2 Cambio de temperatura en una pila de energía con diferente configuración del circuito primario modelada en COMSOL Multiphysics (adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2020).....	55
Figura 3.3 Cambio de temperatura y error relativo de los resultados con <i>RTEMP</i> y los modelos numéricos de diferentes pilas de energía. Las líneas punteadas coinciden con el eje vertical derecho y las líneas continuas con el eje vertical izquierdo	56
Figura 3.4 Cambio de temperatura promedio y a diferentes profundidades de la pila de energía <i>in situ</i> con tubería en espiral (adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2020).....	57
Figura 3.5 Cambios de temperatura y error relativo de diferentes pilas de energía (adaptado de Brettmann y Amis, 2011).....	60
Figura 3.6 Distribución de la temperatura en sección transversal de una pila de energía a la profundidad de 0.3 m al inicio del ciclo de calentamiento	61
Figura 3.7 Error relativo y respuesta térmica promedio, representativa y a diferentes profundidades de la pila (adaptado de Murphy <i>et al.</i> , 2015).....	64
Figura 3.8 a) Vista longitudinal e instrumentación de la pila, los círculos con cruz son los sensores embebidos EMB y los rombos con raya son los sensores acoplados SIS, b) Corte	

transversal de la pila funcionando con un solo bucle en U y c) Corte transversal de la pila funcionando con los tres bucles de U en serie (adaptado de Singh <i>et al.</i> , 2015).....	66
Figura 3.9 Resultados de pruebas de calentamiento en pilas de energía con diferente configuración del circuito primario y diferente esquema de prueba: a) 1-Bucle CP, b) 3-Bucles CP y c) 3-Bucles LP (adaptado de Murphy <i>et al.</i> , 2015).....	68
Figura 3.10 Resultados, error relativo de <i>RTEMP</i> y la tendencia promedio de las mediciones en campo de diferentes pruebas en una pila de energía: a) vista completa, b) ampliación a 10 días (fin de prueba 3-Bucles CP) y c) ampliación a tres días (fin de prueba 1-Bucle CP) con error relativo medio de las tres pruebas.....	69
Figura 3.11 Perfil de temperatura de las pilas de energía en tres pruebas con diferente tubería. Por la duración de prueba, de izquierda a derecha están en verde los resultados de la prueba 1-Bucle CP, en rosa los de 3-Bucles CP y en azul los de 3-Bucles LP (adaptado de Singh <i>et al.</i> , 2015).....	70
Figura 3.12 Distribución de carga axial termo-mecánica con la profundidad: a) Combinación 1, b) Combinación 2	73
Figura 3.13 Desplazamiento vertical de las diferentes pilas, a) Combinación 1, b) Combinación 2.....	74
Figura 4.1 Cargas térmicas de diseño para la Residencia C73	81
Figura 4.2 Cargas térmicas del suelo para el cálculo del cambio de temperatura representativo en las pilas de energía de la Residencia C73	82
Figura 4.3 Vista en planta de la cimentación de la Residencia C73 (adaptado de López-Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	83
Figura 4.4 Sección transversal de la pila de prueba en la Residencia C73 (adaptado de López-Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	83
Figura 4.5 Cambios de temperatura horarios y mensuales en una pila de 0.8 m de diámetro en la Residencia C73 simulados durante un año	85
Figura 4.6 Cambios de temperatura representativos de una pila de 0.8 m diámetro de la Residencia C73 en operación continua, simulados durante 20 años	85
Figura 4.7 Relación entre la longitud/ancho y el factor de desplazamiento de una placa infinitamente rígida que descansa sobre un semiespacio elástico semi infinito (adaptado de Laloui y Rotta-Loria, 2019).....	88

Figura 4.8 Desplazamiento vertical de la pila: a) Combinación 1, b) Combinación 2, c) Combinación 3.....	92
Figura 4.9 Distribución de carga axial con la profundidad: a) Combinación 1, b) Combinación 2 y c) Combinación 3	93
Figura 4.10 Desplazamiento vertical de la pila: a) Combinación 4 y b) Combinación 5.....	94
Figura 4.11 Diagrama de interacción de pila de energía de 0.8 m de diámetro obtenido con SAP2000.....	95
Figura I.1 Cargas térmicas no balanceadas (sinusoidales) a las que se encuentra sometida la pila. Las curvas rojas presentan mayor calefacción, mientras que las azules mayor refrigeración.....	113
Figura I.2 Cargas balanceadas y no balanceadas (sinusoidales) normales e invertidas. Las curvas azules representan mayor refrigeración, las rojas mayor calefacción y las negras representan la misma magnitud de calefacción como de refrigeración.....	113
Figura I.3 Resultados de calibración del código <i>RTEMP</i> para diferentes cargas sinusoidales. De lado izquierdo se encuentran los resultados bajo cargas normales, de lado derecho aquellos bajo cargas invertidas, a) y b) bajo carga balanceada <i>QBal</i> , c) y d) bajo carga no balanceada <i>Q2 Real</i> , e) y f) bajo carga no balanceada <i>Q3 Real</i>	115
Figura I.4 Resultados de calibración del código <i>RTEMP</i> para diferentes diámetros de pila	117
Figura I.5 Resultados del análisis de sensibilidad del código <i>RTEMP</i> sobre la influencia de un cambio del diámetro de pila en el cambio de temperatura representativo.....	117
Figura I.6 Resultados de calibración del código para diferente cantidad de tubos de intercambio de calor (adaptado de Song <i>et al.</i> , 2022)	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación y usos de los recursos geotérmicos en función de la temperatura (adaptado de Andraca-Gutiérrez y Rodríguez-Marian, 2012).....	6
Tabla 2.2 Clasificación general de las bombas de calor según la fuente externa de activación, el modo de operación, el tipo de medio con el que intercambian calor y el fluido con el que funcionan en su interior	7
Tabla 2.3 Parámetros que afectan el diseño de las pilas de energía (adaptado de Mohamad <i>et al.</i> , 2021).....	22
Tabla 3.1 Resumen de algunos modelos analíticos para análisis térmicos de intercambiadores de calor (adaptado de Arenas- Moreno, 2023; Li <i>et al.</i> , 2016).....	29
Tabla 3.2 Ventajas, desventajas, conclusiones y recomendaciones del modelo analítico para el cálculo del cambio representativo de temperatura en el diseño termo-mecánico de pilas de energía propuesto por Song <i>et al.</i> (2022)	41
Tabla 3.3 Modelos para estimar la resistencia térmica del concreto (adaptado de Arenas Moreno, 2023)	42
Tabla 4.1 Factores analizados para la evaluación del método para la obtención de los cambios de temperatura representativos en pilas de energía implementado con el código <i>RTEMP</i> ..	52
Tabla 4.2 Propiedades térmicas del suelo (adaptado de Wu <i>et al.</i> , 2020)	53
Tabla 4.3 Parámetros utilizados en el código <i>RTEMP</i> para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de pila de energía con tubería en espiral.....	54
Tabla 4.4 Propiedades del suelo del sitio de prueba (adaptado de Brettmann y Amis, 2011)	58
Tabla 4.5 Parámetros utilizados en el código <i>RTEMP</i> para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de APGE Piles	59
Tabla 4.6 Propiedades del suelo en el sitio de prueba (adaptado de Murphy <i>et al.</i> , 2015) ..	61
Tabla 4.7 Parámetros utilizados en el código <i>RTEMP</i> para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso US Academy Air Force.....	62
Tabla 4.8 Propiedades del suelo en el sitio de prueba (adaptado de Singh <i>et al.</i> , 2015).....	65
Tabla 4.9 Parámetros utilizados en el código <i>RTEMP</i> para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de pila de energía con celdas Osterberg	66

Tabla 4.10 Camios de temperatura representativos en el momento de mayor error entre las mediciones <i>in-situ</i> y <i>RTEMP</i>	72
Tabla 4.11 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 1	74
Tabla 4.12 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 2	75
Tabla 4.13 Resumen de evaluación de los resultados de <i>RTEMP</i> contra los de diferentes casos	78
Tabla 5.1 Resumen de parámetros utilizados en el código <i>RTEMP</i> para la obtención del cambio de temperatura representativo de la pila de energía.....	83
Tabla 5.2 Resumen de la estratigrafía del sitio y sus propiedades mecánicas.....	89
Tabla 5.3 Resumen de cargas termo-mecánicas de diseño utilizadas en el modelo de transferencia de cargas.....	90
Tabla 5.4 Resumen de combinaciones de carga para la revisión de los estados límite de falla y de servicio.....	91
Tabla 5.5 Revisión por estado límite de falla	93
Tabla 5.6 Revisión por estado límite de servicio.....	94
Tabla I.1 Propiedades térmicas utilizadas para la calibración del código en el método de Song <i>et al.</i> (2022)	112
Tabla I.2 Verificación de ecuaciones del cambio de temperatura promedio y resistencia térmica del concreto para diferente número de tubos de intercambio de calor. La tendencia a ser mayor está representada en degradado verde, mientras que la tendencia a ser menor en degradado rojo	119

RESUMEN

Las pilas de energía son un tipo de estructura termoactiva que, además de funcionar como elemento estructural de cimentación, actúa como intercambiador de calor para el acondicionamiento de espacios aprovechando recursos geotérmicos de baja entalpía. Gracias a su eficiencia energética, que les permite reducir el impacto ambiental, las pilas de energía representan una alternativa de cimentación sustentable, rentable y práctica para las futuras edificaciones en México y en el mundo. Pese a sus múltiples beneficios, su implementación en México se ha visto restringida debido a la falta de capacitación constructiva y operativa de este tipo de elementos, el desconocimiento sobre las propiedades térmicas de los suelos nacionales, y la necesidad de métodos de diseño que consideren el comportamiento dual de las pilas de energía.

Un correcto diseño termo-mecánico debe caracterizar el comportamiento térmico de la interacción suelo-pila atendiendo a la influencia de diversos factores, como la interacción entre componentes y sus propiedades térmicas, los tiempos de simulación y la exactitud de resultados, procurando abastecer el máximo posible de la demanda energética mientras se respeta la relación que tiene con el diseño estructural predeterminado de la pila. Por lo tanto, una simulación geotécnica-estructural adecuada debe considerar el comportamiento acoplado de los efectos térmicos y mecánicos a los que el elemento es sometido. Dada la complejidad del análisis, se recurre a métodos numéricos para resolver este problema, a pesar de los costos y tiempos de ejecución que implican. Sin embargo, actualmente existen métodos menos complejos, económicos y prácticos para analizar el efecto de la temperatura en la respuesta mecánica de las pilas de energía. Estos modelos simplifican el análisis de flujo de calor en los componentes de la estructura y representan una herramienta complementaria al análisis de pilas de energía mediante enfoques desacoplados para el diseño termo-mecánico.

En este contexto, esta tesis evalúa algunos de los métodos analíticos más utilizados en la práctica para caracterizar la respuesta térmica de pilas de energía. Se llevó a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de diversas pruebas en campo y modelaciones numéricas (Brettmann y Amis, 2011; Murphy *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020) y los generados mediante un modelo analítico implementado en Matlab®, denominado “*RTEMP*”, basado en la metodología propuesta por Song *et al.* (2022). El código permite calcular la variación de temperatura promedio en las secciones transversales de la pila en todo su volumen. Se evalúa su precisión y se demuestra su aplicabilidad e importancia en el diseño termo-mecánico de pilas de energía, con un caso de estudio en la Ciudad de México.

Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la metodología analítica implementada describe de manera precisa el comportamiento térmico individual de las pilas de energía y complementa el uso de métodos desacoplados para su diseño termo-mecánico.

ABSTRACT

Energy piles are a type of thermo-active structure that, in addition to serving as a structural foundation element, act as heat exchangers for space conditioning by harnessing low-enthalpy geothermal resources. Due to their energy efficiency, which helps reduce environmental impact, energy piles represent a sustainable, cost-effective, and practical foundation alternative for future buildings in Mexico and around the world. Despite their multiple benefits, their implementation in Mexico has been limited due to the lack of construction and operational training for this type of element, the absence of knowledge about the thermal properties of local soils, and the need for design methods that consider the dual behavior of energy piles.

A proper thermo-mechanical design must characterize the thermal behavior of the soil-pile interaction, considering various factors such as the interaction between components and their thermal properties, simulation times, and result accuracy. This ensures that the maximum possible energy demand is met while maintaining the relationship with the predetermined structural design of the pile. Therefore, an adequate geotechnical-structural simulation should consider the coupled behavior of thermal and mechanical effects to which the element is subjected. Given the complexity of this analysis, numerical methods are commonly used to solve this problem, despite the associated costs and execution times. However, there are currently less complex, more economical, and practical methods to analyze the effect of temperature on the mechanical response of energy piles. These models simplify the analysis of heat flow in the structure's components and serve as a complementary tool for the analysis of energy piles through decoupled approaches for thermo-mechanical design.

In this context, this thesis evaluates some of the most widely used analytical methods in practice to characterize the thermal response of energy piles. A comparative analysis was conducted between the results obtained from various field tests and numerical models (Brettmann y Amis, 2011; Murphy *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020) and those generated by an analytical model implemented in Matlab®, called "*RTEMP*", based on the methodology proposed by Song *et al.* (2022). The code calculates the average temperature variation in the pile's cross-sections throughout its volume. Its accuracy is assessed, and its applicability and importance in the thermo-mechanical design of energy piles are demonstrated through a case study in Mexico City.

Based on the obtained results, it was determined that the implemented analytical methodology accurately describes the individual thermal behavior of energy piles and complements the use of decoupled methods for their thermo-mechanical design.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático ha ocasionado un incremento en la temperatura media mundial, fenómenos meteorológicos extremos y sequías. El uso de combustibles fósiles contribuye en gran parte debido a las emisiones de gases de efecto invernadero que atrapan el calor del sol y elevan la temperatura del planeta. Por otra parte, la generación de energía representa el 73% de los gases de efecto invernadero causados por actividades antropogénicas (Organización de las Naciones Unidas, 2023). Por lo tanto, existe un creciente interés en el sector de las energías renovables, ya que representan una alternativa altamente eficiente para reducir el impacto ambiental relacionado con la actividad humana.

En diversos países, incluido México, el tema de las energías renovables es una prioridad para cumplir los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en 2030, adoptados por la ONU en 2015 con el propósito de cuidar el planeta y el medio ambiente. Por lo tanto, se ha invertido en energías derivadas de fuentes renovables como la hidráulica, solar, eólica y geotérmica, mostrando un crecimiento notable en las últimas tres décadas, casi duplicándose hasta 2018 (Romero y Higinio, 2021).

La energía geotérmica se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra y su temperatura varía en función de la profundidad de captación. Según esta temperatura, existen recursos de alta entalpía ($T > 150^{\circ}\text{C}$), media entalpía ($90^{\circ} < T < 150^{\circ}$) y baja entalpía ($T < 90^{\circ}$). En estos últimos, la energía puede captarse de manera eficiente debido a la estabilidad térmica del subsuelo y su aplicación son los usos directos del calor como el

aporte energético a sistemas de calefacción/refrigeración con bombas de calor geotérmico (Prol Ledesma, 2023).

Las Bombas de Calor Geotérmico (BCG) son máquinas térmicas que permiten aprovechar la energía geotérmica a partir de la diferencia de temperatura entre dos lugares, proporcionando calefacción o refrigeración al espacio. Las BCG han sido utilizadas principalmente para el acondicionamiento de espacios en países como: Reino Unido, Austria, Alemania y Suiza, México, Estados Unidos, China, Canadá, España, entre otros (Brandl H., 2006; García Gutiérrez *et al.*, 2008; García Gutiérrez y Martínez Estrella, 2012). Las principales ventajas de estos sistemas son: menores costos durante su operación, reducción de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, sencillez en su mantenimiento, mayor eficiencia y una vida útil más prolongada respecto otros sistemas de calefacción (García Gutiérrez y Martínez Estrella, 2012).

Las pilas de energía son un tipo de estructura termoactiva, dotadas de tubería para el intercambio (inyección/extracción) de calor con el suelo y acopadas a una BCG, que permite aprovechar la energía geotérmica superficial mientras proveen soporte estructural al edificio. Estas han sido implementadas con éxito en países de Europa como Reino Unido, Austria y Alemania (Abuel-Naga *et al.*, 2015). No obstante, otros países rechazaron esta opción debido al desconocimiento sobre el impacto de las cargas térmicas y los cambios de temperatura en el desempeño estructural de la pila. Actualmente se sabe que la adición de cargas térmicas en una pila de cimentación puede inducir esfuerzos y deformaciones de magnitud significativa que pueden exceder el estado límite de servicio (Laloui y Rotta-Loria, 2019; Rotta Loria *et al.*, 2020). Por lo tanto, llevar a cabo un diseño adecuado considerando el comportamiento dual de estos elementos requiere un estudio holístico sobre el efecto de la temperatura en la respuesta mecánica de la estructura.

El análisis del comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía ha estado en constante desarrollo con el aporte de herramientas computacionales que facilitan la implementación de los métodos de análisis de respuesta térmica y termo-mecánica propuestos en la literatura internacional (Chen y McCartney, 2017; Eskilson, 1987; Ingersoll *et al.*, 1955; Knellwolf *et al.*, 2011; Zeng *et al.*, 2002). Existen algunos softwares comerciales (ABAQUS, COMSOL Multiphysics, PLAXIS, GeoStudio, etc.) que son capaces de simular parcial o completamente el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía, ofreciendo resultados precisos y útiles para el diseño de las pilas de energía. No obstante, estos programas utilizan métodos numéricos con una gran cantidad de parámetros de entrada que demandan mayores recursos de cómputo y tiempos de ejecución. Por otra parte, existen algunos métodos analíticos para determinar la respuesta térmica de las pilas de energía (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b; Song *et al.*, 2022) que, al integrarse con métodos desacoplados, particularmente con métodos de transferencia de carga termo-mecánicos, simplifican el análisis y diseño de estos elementos. Este tipo de modelos proporciona estimaciones confiables y presenta ventajas económicas y prácticas respecto a los métodos numéricos/métodos acoplados. Sin embargo, estos modelos

han sido probados en un número limitado de casos de estudio y condiciones específicas (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b; Song *et al.*, 2022), lo que plantea dudas sobre su precisión y demanda una mayor aplicación en diversos escenarios para validar su fiabilidad.

El objetivo principal de esta tesis es evaluar las metodologías analíticas más relevantes para determinar la respuesta térmica de pilas de energía, mediante un análisis comparativo entre los datos obtenidos en pruebas de campo, modelaciones numéricas y los resultados generados con un código desarrollado en Matlab®, basado en la metodología propuesta por Song *et al.* (2022). En este sentido, el presente trabajo pretende, por una parte, validar la aplicabilidad y precisión de estos modelos, y, por otra, demostrar su utilidad en el diseño termo-mecánico de pilas de energía al integrarlos con métodos desacoplados.

Esta tesis se conforma por una breve introducción y cinco capítulos. En el Capítulo 1 se describe a la energía geotérmica y los componentes principales de un sistema de intercambio de calor geotérmico a base de pilas de energía para el aprovechamiento de este recurso. Se ilustra el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía y su desempeño ante cargas termo-mecánicas. Asimismo, se presentan las consideraciones teóricas para el análisis térmico de estas estructuras. Por último, se detalla un esquema de diseño integral de pilas de energía, enfatizando la conexión entre el diseño térmico y el diseño geotécnico, a través del cálculo de la variación de temperatura como parámetro de entrada en el diseño termo-mecánico.

En el Capítulo 2 se exponen algunos métodos de análisis térmico para intercambiadores de calor geotérmicos, con énfasis en el Modelo de Fuente de Línea Finita (FLSM, *Finite Line Source Model* por sus siglas en inglés). Posteriormente, se detallan algunos modelos analíticos para el cálculo del cambio de temperatura representativo y un modelo de transferencia de cargas utilizados en el diseño termo-mecánico de pilas de energía.

En el Capítulo 3 se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos para la respuesta térmica de pilas de energía, considerando pruebas de campo, modelaciones numéricas y los resultados de un modelo analítico implementado en un código en lenguaje Matlab® (*RTEMP*), con el objetivo de evaluar su aplicabilidad y precisión. El análisis permite evaluar la precisión de la metodología en función de diversos factores, tales como la geometría de la pila, las propiedades térmicas, la configuración del circuito primario, las cargas térmicas, el modelo de respuesta térmica y el tiempo.

En el Capítulo 4 se presenta un caso de estudio que desarrolla un proceso simplificado de diseño termo-mecánico de una pila de energía en la Ciudad de México. Este caso tiene como objetivo demostrar la utilidad de los métodos analíticos evaluados en el análisis térmico, integrándolos con un modelo de transferencia de cargas termo-mecánico.

Finalmente, en el Capítulo 5 se dan conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis anteriores.

1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

1.1 Energía y sistemas geotérmicos

Se le denomina energía geotérmica a aquella que se encuentra almacenada en forma de calor en el interior de la Tierra y que puede ser aprovechada por la cantidad de calor generado según las características geotérmicas del medio, como la geología (volcanes, fallas o fracturas), el gradiente geotérmico (tasa a la que incrementa la temperatura con la profundidad), la conductividad térmica (capacidad de los materiales para conducir el calor), calor radiogénico (desintegración de isótopos radiactivos en las rocas) entre otras. La cantidad de calor que se genera depende de la ubicación y configuración de estas características en conjunto, con temperaturas mayores a los 5000 °C en el núcleo de la Tierra, y temperaturas de alrededor de 300 °C a tres kilómetros de profundidad desde la superficie (Prol Ledesma, 2023).

La fracción de energía geotérmica que es susceptible para ser aprovechada por el hombre se define como recurso geotérmico. Su aplicación y clasificación depende de la temperatura del recurso como se presenta en la Tabla 1.1, siendo los recursos de baja y muy baja entalpía los más utilizados dada la estabilidad térmica del subsuelo frente a la oscilación estacional.

Tabla 1.1 Clasificación y usos de los recursos geotérmicos en función de la temperatura (adaptado de Andraca-Gutiérrez y Rodríguez-Marian, 2012)

Recurso geotérmico	Temperatura (°C)	Uso	Sistema de aprovechamiento
Alta entalpía	$T > 150$	Producción de energía eléctrica	Planta de flasheo
Media entalpía	$90 < T < 150$	Producción de energía eléctrica	Plantas de ciclo binario
Baja entalpía	$25 < T < 90$	Uso directo del calor para calefacción de viviendas, procesos industriales y uso agrícola	Bombas de calor
Muy baja entalpía	$T < 25$	Agua caliente sanitaria y aire acondicionado	Bombas de calor geotérmico (BCG)

Los sistemas geotérmicos son una serie de procesos que dan como resultado una descarga de calor en la superficie terrestre a través de un fluido, como gases, agua o roca fundida (Prol Ledesma, 2023). Estos sistemas pueden ser observados en la naturaleza mediante manifestaciones superficiales como: manantiales, fumarolas, pozas de agua caliente, pozas de lodo con descarga de gases, erupciones volcánicas, entre otras. No obstante, también pueden ser creados artificialmente y, según las condiciones geotérmicas del sitio, son capaces de aprovechar el calor del subsuelo en dos principales tipos de generación de energía:

- I. Generación eléctrica y termoelectrónica: utiliza recursos geotérmicos de alta o media temperatura (alta entalpía)
- II. Generación térmica: emplea recursos geotérmicos de baja y muy baja temperatura (baja entalpía)

La aplicación de los recursos de baja y muy baja temperatura depende de los usos directos del calor como el aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración mediante la utilización de bombas de calor o Bombas de Calor Geotérmico (BCG). Debido a que estas últimas poseen ventajas en cuanto a rendimiento, costo, ahorro, eficiencia, instalación y beneficio al ambiente respecto a otras tecnologías de acondicionamiento de espacios, las BCG han ganado popularidad en los últimos años, aumentando su uso alrededor del mundo e impulsando el crecimiento en el uso de la energía geotérmica. De acuerdo con las estadísticas de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2019, 2021), el uso de la energía geotérmica para la generación de electricidad ha aumentado de 92 TWh¹ a 95 TWh de 2019 a 2021.

¹ Tera watt-hora, unidad de medida de energía equivalente a mil millones de watts-hora

1.2 Bomba de calor

Una bomba de calor puede definirse como un sistema térmico que proporciona calor o frío a través de un ciclo reversible que es accionado por una fuente de energía externa, como electricidad o gases, y se clasifican según el medio con el que intercambian calor, como el aire (aerotérmicas), agua (hidrotérmicas) o el suelo (geotérmicas) (Asociación de fabricantes de equipos de climatización, 2023). Estas máquinas se utilizan principalmente en el acondicionamiento de espacios debido a que aprovechan la energía geotérmica de baja entalpía almacenada en los primeros metros de la corteza terrestre y puede ser captada fácilmente.

En la Tabla 1.2 se presenta un resumen de las bombas de calor de acuerdo con la fuente externa de activación, el modo de operación, el medio con el que intercambia calor y el fluido que circula en el interior de la bomba.

Tabla 1.2 Clasificación general de las bombas de calor según la fuente externa de activación, el modo de operación, el tipo de medio con el que intercambian calor y el fluido con el que funcionan en su interior

Fuente externa de activación	Modo de operación	Medio con el que intercambia calor	Fluido circulante al interior de la bomba
Eléctrica o Gas	Reversible	Agua	Agua
		Agua	Aire
	No reversible	Aire	Agua
		Aire	Aire

Con base en Tabla 1.2 se pueden definir las denominaciones más comunes de las bombas de calor. Estas denominaciones utilizan dos palabras separadas por un guion, por ejemplo, agua-agua o aire-agua, donde la primera palabra indica el medio con el que la bomba intercambia calor en el exterior, y la segunda palabra indica el medio con que la bomba transfiere el calor en el circuito interno.

Las Bombas de Calor Geotérmico (GSHP, *Ground Source Heat Pumps* por sus siglas en inglés) se distinguen porque su fuente de energía proviene del suelo, extrae el calor del subsuelo y lo transporta a un nivel requerido sobre la superficie para abastecer la demanda de energía de la edificación. Su funcionamiento es más parecido al de las bombas de calor agua-agua ya que utilizan en su circuito agua para intercambiar calor. En un circuito abierto el agua procede de un lago, río o del subsuelo, mientras que para un circuito cerrado se encuentra un fluido caloportador que circula al interior (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2019).

Es importante señalar que, el funcionamiento y el comportamiento de una bomba de calor es diferente al de una BCG por el tipo de fuente de intercambio de calor, el fluido circulante y

la fuente de activación externa; su eficiencia, durabilidad, componentes e instalación también dependen de los tres factores mencionados.

1.2.1 Componentes del sistema de intercambio de calor

Para que una BCG pueda ejecutar el proceso de calefacción o enfriamiento del espacio, es necesario dotarla de otros componentes que conforman el sistema de intercambio de calor. De acuerdo con Brandl (2006), estos componentes pueden clasificarse en tres grupos: el circuito primario, el circuito secundario y la bomba calor.

Los componentes internos de las bombas de calor son los responsables de realizar el proceso físico que absorbe y libera el calor. Estos dependen del tipo de bomba de calor que se utilice, pero usualmente tienen cinco componentes principales (Figura 1.1):

- I. **El evaporador:** En este dispositivo se realiza el cambio de fase del fluido circulante, de líquido a vapor
- II. **El compresor:** Se comprime al fluido circulante aumentando su presión
- III. **El condensador:** Se ejecuta el cambio de fase del fluido circulante, de vapor a líquido
- IV. **La válvula de expansión:** Regula la entrada del líquido circulante procedente del condensador al evaporador
- V. **El fluido caloportador:** Puede ser un refrigerante (mezcla de agua con anticongelante), agua o una solución salina, su función es la de ser el fluido circulante en el sistema encargado de hacer el transporte del calor (Brandl, 2006). Las condiciones físicas con las que opere el sistema son afectadas directamente por él, pues según su composición y mezcla, puede ocasionar corrosión y dañar el circuito.

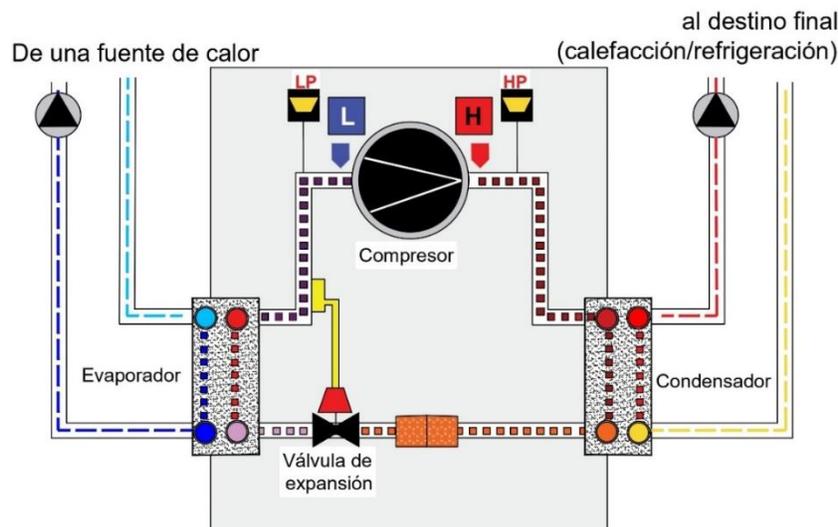


Figura 1.1 Componentes principales de las bombas de calor (adaptado de Sarbu y Sebarchievici, 2014)

Por otra parte, el circuito primario está compuesto por un sistema cerrado o abierto de tuberías, comúnmente de polietileno o polibutileno, instalado en el suelo (la fuente de calor) y dispuesto de manera horizontal o vertical. La configuración de las tuberías puede ser en serie o paralelo, dependiendo las ventajas que implica cada una y los criterios de selección pertinentes (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, 2012). Su función principal consiste en permitir la circulación del fluido caloportador (para un circuito cerrado) o agua de la fuente externa (para un circuito abierto) al nivel del subsuelo para intercambiar el calor hacia a la bomba y que esta conecte el fluido hacia el circuito secundario.

Finalmente, el circuito secundario está conformado por una red de tuberías instaladas en los pisos y paredes de la edificación para proporcionar calefacción/refrigeración con el calor extraído por el circuito primario. Ambos circuitos se conectan a través de la bomba de calor que transfiere la energía térmica de un lugar a otro por medio de un ciclo de refrigeración reversible que permite ofrecer frío o calor según sean las necesidades de acondicionamiento del edificio. En la Figura 1.2 se presenta un esquema general del sistema de intercambio de calor para una casa habitación.

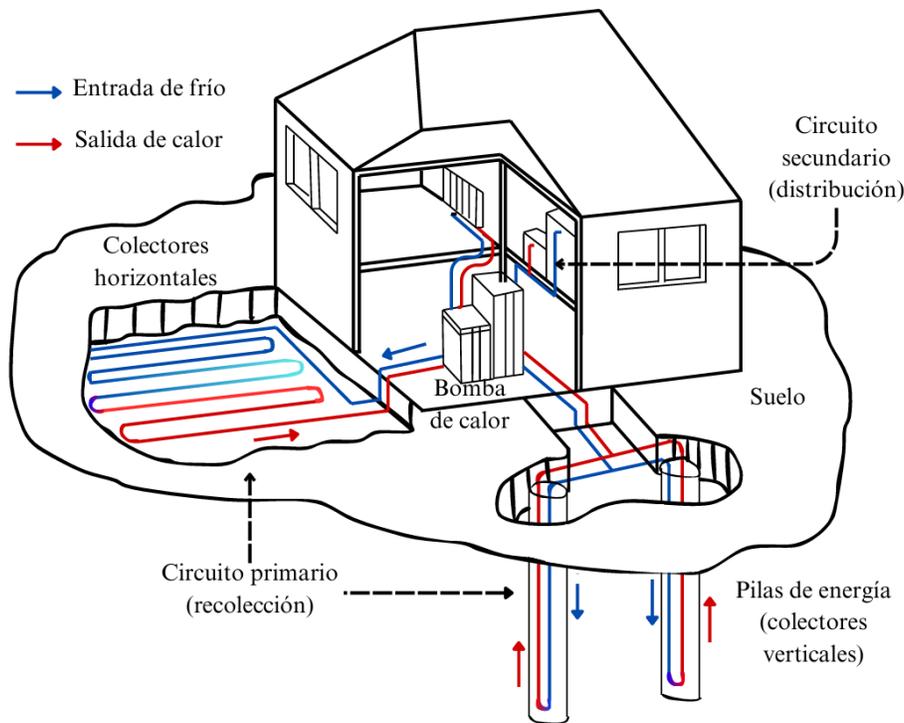


Figura 1.2 Esquema general del sistema de intercambio de calor (adaptado de Brandl, 2006)

1.3 Estructuras termoactivas y pilas de energía

Las estructuras termoactivas son elementos de cimentación acoplados a sistemas de intercambio de calor que permiten extraer o inyectar energía del/al suelo aprovechando recursos geotérmicos de baja entalpía a una profundidad de aproximadamente 15 m bajo la

superficie, donde la temperatura es constante y suele acercarse a la temperatura ambiente media anual del sitio de captación. Estos elementos abastecen la demanda energética de las edificaciones mientras proveen soporte estructural, algunos ejemplos son: anclajes, muros diafragmas, pilas, pilotes, losas de cimentación y muros de retención.

Las pilas de energía son un tipo de estructura termoactiva que cuentan con un sistema cerrado de tuberías de intercambio de calor en su interior. Estas se encuentran dispuestas en diferentes configuraciones, como se muestra en la Figura 1.3. Las tuberías en U son las más usadas en esta estructura ya que ofrecen mejor trabajabilidad y eficiencia económica. Sin embargo, existen otras configuraciones geométricas que proporcionan mayor transferencia de calor, como la tubería tipo W, aunque su instalación es más complicada que la primera. Asimismo, existen configuraciones sobre un mismo eje (coaxiales), en espiral o en hélice y variaciones de las formas U y W, aprovechando la disposición en serie o paralelo.

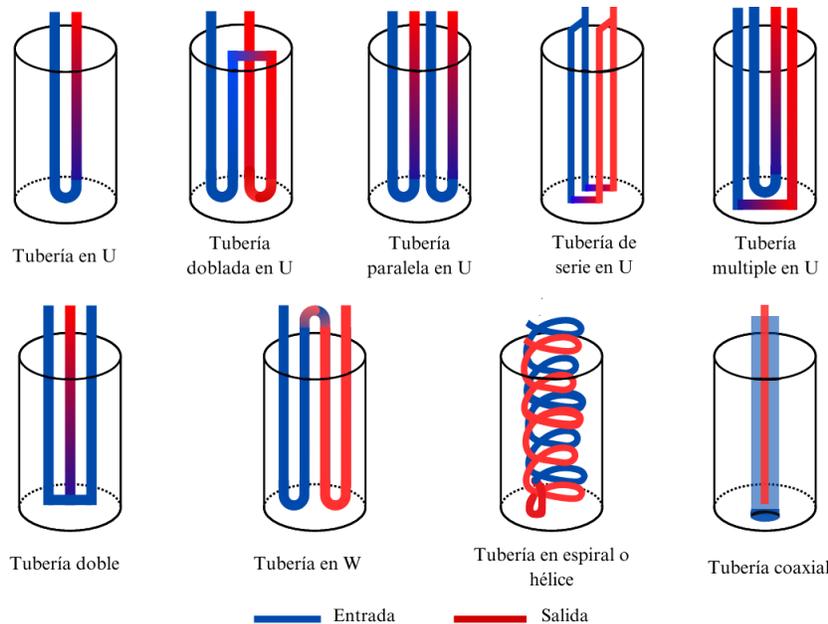


Figura 1.3 Principales configuraciones geométricas de tubería vertical para pilas de energía (adaptado de Mohamad *et al.*, 2021)

El flujo de calor en las tuberías del sistema involucra un proceso termodinámico complejo entre el fluido caloportador, la pila y el suelo. Dicho proceso induce cambios de temperatura que generan esfuerzos y deformaciones térmicos adicionales en la pila y el suelo. Estos efectos, fundamentales para garantizar la operación y condición estructural de la pila, deben ser evaluados mediante un análisis termo-mecánico. Dicho análisis requiere la elección de un modelo térmico confiable, cuyos resultados permitan determinar el impacto de la temperatura en la respuesta mecánica de la estructura.

1.4 Comportamiento termo-mecánico de pilas de energía

La principal diferencia en el comportamiento de las pilas de energía respecto a las convencionales es la carga térmica a la que se encuentran sometidas. Dicha carga está directamente relacionada con la demanda energética del edificio y depende de la temporada del año en la que se suministre calor o refrigeración, por lo que no es una carga estática ni mucho menos constante, pero sí es cíclica. Estas características vuelven a las pilas de energía estructuras más complejas de analizar, por lo que mencionar algunos de los efectos del cambio de temperatura en el comportamiento de la pila puede ayudar a dimensionar la magnitud de sus consecuencias y la importancia de analizar la respuesta termo-mecánica.

En ensayos de laboratorio y pruebas de campo para pilas convencionales (Abbs *et al.*, 1988; Chan y Hanna, 1980; Nauroy *et al.*, 1985; Poulos, 1988) se ha observado que la aplicación de ciclos de carga (únicamente mecánica) puede reducir la resistencia por fricción de la pila y por lo tanto su capacidad de carga. Análogamente, al estar sometidas a ciclos de carga térmica, las pilas de energía pueden sufrir cambios importantes en la capacidad de carga.

Por otra parte, Bourne-Webb *et al.* (2016) concluyeron que, la variación de temperatura en pilas de energía bajo condición de servicio puede regir el diseño estructural de la pila cuando esta sea de gran longitud o los cambios de temperatura sean significativos. Los autores advierten que, la respuesta mecánica de estos elementos puede modificar la resistencia y deformabilidad del suelo circundante y que, ante ello, es necesario verificar el comportamiento termo-mecánico de los estratos y la pila misma.

Laloui y Rotta-Loria (2019) llevaron a cabo un estudio que responde a las cuestiones sobre la influencia de las cargas térmicas en la respuesta mecánica de las pilas de energía y el rol de esas cargas en el diseño geotécnico-estructural. Los resultados de este estudio indican que los efectos provocados por el acoplamiento de las cargas mecánicas y térmicas puede ser suficientes para provocar la falla de servicio, especialmente cuando la estructura se encuentra en un ciclo de enfriamiento, resaltando que en este caso el diseño del refuerzo con acero debe ser evaluado tomando en cuenta los efectos térmicos. Por lo tanto, proponen que se realice una evaluación de la respuesta mecánica de la pila con el acoplamiento de las cargas térmicas y mecánicas para asegurar que no se rebase el estado límite de servicio y de falla, aunque en este último no represente un riesgo alto.

Por último, Feng *et al.* (2024) llevaron a cabo un estudio donde implementan un modelo de transferencia de carga que permite acoplar las deformaciones del suelo y la interfaz pila-suelo para el estudio de la respuesta termo-mecánica de pilas de energía. Entre los resultados que obtuvieron se expuso que los ciclos de carga térmica, con una carga axial grande en la cabeza de la pila pueden inducir una respuesta irreversible en las pilas de energía y pueden presentarse esfuerzos de compresión residuales y asentamientos acumulados que deben ser analizados en el diseño de las pilas de energía. Por lo anterior, determinar la respuesta térmica

(o cambio de temperatura) de las pilas de energía es necesario y de suma importancia para diseñar correctamente estas estructuras.

Para comprender los efectos generales que las cargas termo-mecánicas pueden ocasionar en la pila, Rotta-Loria y Laloui (2018) proponen una serie de esquemas basados en los resultados de pruebas de carga *in situ* presentados por Bourne-Webb *et al.* (2009, 2013). En estos esquemas se describen los esfuerzos y deformaciones basados en la teoría lineal termo-elástica, que considera un comportamiento mecánico reversible asociado a la propiedad de elasticidad, y sirve como referencia para el diseño preliminar en situaciones caracterizadas por condiciones irreversibles (relacionadas con la teoría termoplástica). Los autores presentan tres casos y en cada uno se encuentra la acción de la carga mecánica, cargas térmicas únicamente, y la combinación de ambos:

- I. Respuesta mecánica sin restricción en la punta y en la cabeza (Figura 1.4).
- II. Respuesta mecánica con restricción en la punta o en la cabeza (Figura 1.5).
- III. Respuesta mecánica con restricción en la punta y en la cabeza (Figura 1.6).

Al aplicar cargas térmicas, las pilas de energía se expanden o contraen y se desplazan en direcciones opuestas a partir del denominado eje nulo (EN), que se define como la profundidad en la cual el desplazamiento relativo pila-suelo debido a las cargas térmicas es cero. Este eje depende de las condiciones de restricción en los extremos de la pila, de tal manera que se localiza lo más cercano posible a la región más rígida a una profundidad Z_{EN} o en aquella en la que los efectos mecánicos son menores. Por otro lado, las cargas mecánicas solo provocan desplazamientos y esfuerzos en una sola dirección.

En los tres casos mencionados (I, II, y III), las cargas térmicas generan esfuerzos y deformaciones adicionales al comportamiento mecánico de la pila (indicados al interior del diagrama de la pila con flechas negras para cada caso). Al aplicar cargas de calentamiento la pila tiende a expandirse, en consecuencia, los esfuerzos de compresión y los desplazamientos verticales aumentan por debajo del EN . Lo anterior sucede debido a que, en esta zona la acción de las cargas térmicas y mecánicas lleva la misma dirección, lo contrario ocurre arriba del EN . Al enfriar la pila, el elemento tiende a contraerse generando esfuerzos de tensión, donde los desplazamientos incrementan sobre el EN y disminuyen en la parte inferior.

El Caso I (Figura 1.4a) se observa un decremento del esfuerzo de compresión vertical (σ_z) a lo largo de la pila y una distribución uniforme, casi constante, del esfuerzo cortante (τ) positivo en la interfaz entre la pila y el suelo. Además, se presenta una disminución del desplazamiento vertical con la profundidad. Si la pila es más rígida, la distribución del esfuerzo vertical, cortante y el desplazamiento vertical en la cabeza (w) tiende a ser más lineal.

En la Figura 1.4b las cargas térmicas generan una distribución no lineal del esfuerzo vertical. La carga de calentamiento induce esfuerzos cortantes negativos arriba del EN , y positivos por debajo del mismo. Los esfuerzos cortantes y verticales son opuestos arriba del EN y en

la misma dirección debajo del *EN* comparados con la Figura 1.4a. En el caso de enfriamiento, (Figura 1.4c), el comportamiento es simétricamente opuesto. Al aumentar la rigidez de la pila el esfuerzo vertical, cortante y el desplazamiento vertical es más uniforme.

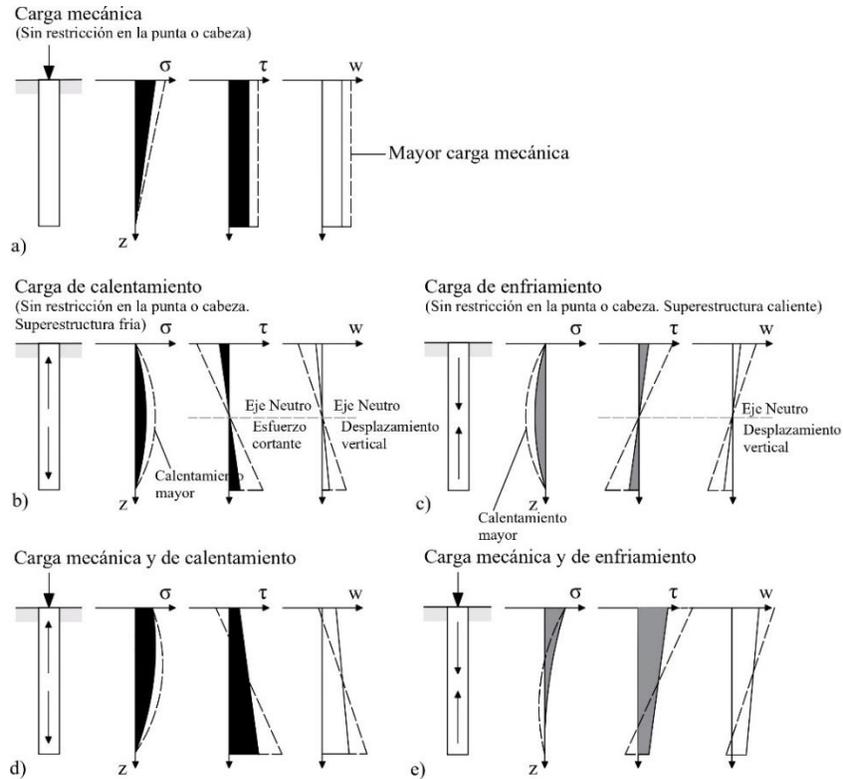


Figura 1.4 Esquema termo-mecánico de una pila de energía sin restricción en la cabeza ni en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)

En el Caso II (Figura 1.5), cuando se aplica únicamente carga mecánica y existe una restricción en la punta se incrementa el esfuerzo vertical en el extremo libre y se reduce el esfuerzo cortante y el desplazamiento vertical. Cuando existe una restricción en la cabeza, el esfuerzo vertical es menor en esta zona. Además, las variaciones del esfuerzo cortante y el desplazamiento vertical son menores respecto al caso donde no se aplican restricciones en los extremos. Por otra parte, cuando hay una restricción en la cabeza, el esfuerzo vertical es menor a lo largo de todo el elemento; el esfuerzo cortante y la deformación en la cabeza son menores respecto al caso donde la pila es totalmente libre de desplazarse.

En la Figura 1.5c y Figura 1.5d el esfuerzo vertical es mayor en la zona donde se ubica la restricción, ya sea en la cabeza o en la punta, mientras que los esfuerzos cortantes y la deformación vertical se reducen conforme avanzan hacia al extremo libre. En la Figura 1.5e y Figura 1.5f, se aplican cargas de calentamiento y mecánicas. Cuando hay una restricción en la punta, se generan esfuerzos verticales mayores, esfuerzos cortantes menores y desplazamientos verticales mayores en la cabeza (extremo libre). En cambio, cuando la restricción se encuentra en la cabeza, se generan esfuerzos verticales menores a lo largo de

la pila, respecto a cuando se encuentra libre. Los esfuerzos cortantes y desplazamientos verticales son mayores hacia el extremo libre (la punta), pero menores comparados al caso donde no existen restricciones en los extremos.

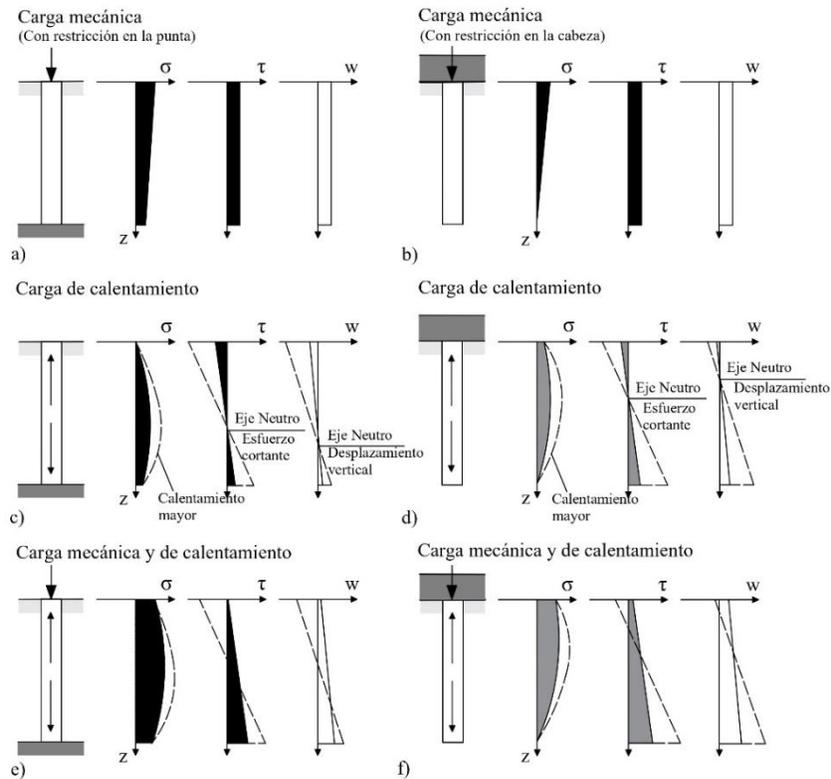


Figura 1.5 Esquema termo-mecánico de una pila de energía con restricción en la cabeza o en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)

En el Caso III (Figura 1.6), si las restricciones en los extremos tienen la misma magnitud el esfuerzo vertical causado por las cargas térmicas se presenta una distribución simétrica. En cambio, en la zona donde se encuentra la restricción más rígida, el perfil tiende a ser asimétrico y los esfuerzos son mayores.

La distribución de los esfuerzos y deformaciones verticales causados por las cargas térmicas depende principalmente de las restricciones en la punta o la cabeza de la pila y de la rigidez del suelo. Entre más rígido sea el medio, las deformaciones inducidas térmicamente son menores y la resistencia a la fricción movilizada disminuye.

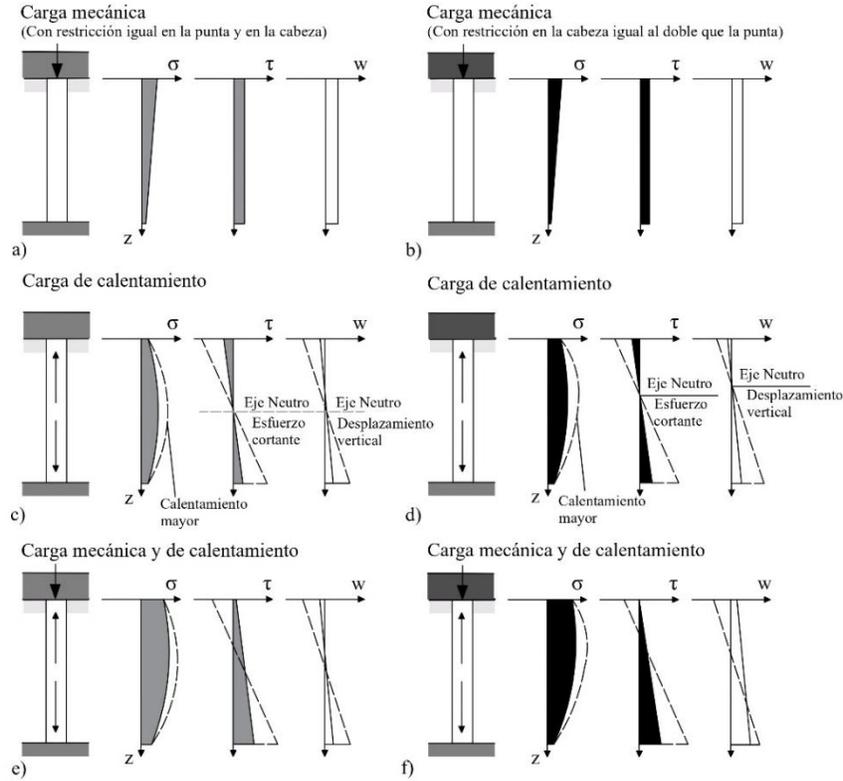


Figura 1.6 Esquema termo-mecánico de una pila de energía con restricción en la cabeza y en la punta (adaptado de Rotta-Loria y Laloui, 2018)

1.4.1 Deformaciones y esfuerzos térmicos en pilas de energía

Abdelaziz y Ozudogru (2016a) establecen que existen deformaciones térmicas libres (ϵ_f), independientes de la resistencia del suelo, que representan la tendencia de un punto a moverse cuando la pila es libre de deformarse (sin restricciones) (Figura 1.7c) bajo la acción de un cambio de temperatura (ΔT_i) (Figura 1.7b). Al tener una relación directa con el coeficiente de expansión térmica (α) del material de la pila, estas deformaciones se expresan como:

$$\epsilon_f = \Delta T_i \alpha_{pile} \tag{1.1}$$

Las deformaciones térmicas libres (ϵ_f) presentan un comportamiento no uniforme debido a su relación directa con el cambio de temperatura local (ΔT_i), el cual es resultado de la variación continua y no uniforme de las cargas térmicas. Sin embargo, debido a que el movimiento de cada punto en la sección transversal de la pila está ligado al movimiento de los puntos adyacentes, se alcanza la compatibilidad de deformaciones que rige la tendencia de cada punto a deformarse libremente, logrando un comportamiento uniforme.

A las deformaciones térmicas que se presentan en la sección transversal de la pila que actúa como un cuerpo libre se les denomina deformaciones libres observadas ($\epsilon_{obs.free}$), mientras

que, en una pila embebida en el suelo, una parte de las $\varepsilon_{obs.free}$ se encuentran bloqueadas por la resistencia externa del suelo, y reciben el nombre de deformaciones observadas ($\varepsilon_{obs.}$). Tanto las $\varepsilon_{obs.free}$ como las $\varepsilon_{obs.}$ están relacionadas con el cambio de temperatura promedio (ΔT_{avg}) en la sección transversal y tienden a un comportamiento uniforme debido a la compatibilidad de deformaciones descrita anteriormente.

Cuando la pila se encuentra restringida, ya sea por la superestructura o el suelo, se presentan deformaciones térmicas restringidas que matemáticamente se expresan como:

$$\varepsilon_{Const} = \varepsilon_f - \varepsilon_{obs.} \quad (1.2)$$

donde $\varepsilon_{obs.}$ son las deformaciones observadas que tienden a ser uniformes (región sombreada en gris de la Figura 1.7d). Las deformaciones restringidas (ε_{Const}) están compuestas por dos términos distintos. El primero se debe a las deformaciones bloqueadas por las resistencias externas (del suelo o superestructura) a lo largo de la pila (ε_{ext}), mientras que la segunda se conforma por las deformaciones bloqueadas internamente en el elemento y que se encargan de lograr la compatibilidad de deformaciones (ε_{int}). Las deformaciones bloqueadas internamente (ε_{int}) no dependen de ninguna resistencia externa y están relacionadas con los esfuerzos y deformaciones en compresión y tensión dentro del elemento. Estos efectos pueden ser usados en el diseño de la pila.

De acuerdo con la Figura 1.7d, las deformaciones bloqueadas internamente a compresión (en rojo y signo negativo) se desarrollan cuando las deformaciones térmicas libres (ε_f) de la pila son mayores que las deformaciones libres observadas ($\varepsilon_{obs.free}$). Las deformaciones bloqueadas internamente a tensión se desarrollan donde $\varepsilon_f < \varepsilon_{obs.free}$ (en azul y signo positivo).

En el caso en que la pila se encuentra restringida, las deformaciones libres observadas ($\varepsilon_{obs.free}$), que se presentarían en una pila libre, ahora se encuentran restringidas por la resistencia que opone el suelo, por lo que las deformaciones restringidas observadas ($\varepsilon_{obs.}$) son menores que aquellas libres observadas en la pila libre. Su diferencia permite obtener las deformaciones bloqueadas externamente (ε_{ext}) (Figura 1.7e) como sigue:

$$\varepsilon_{ext} = \varepsilon_{obs.free} - \varepsilon_{obs} \quad (1.3)$$

Existe una analogía entre las deformaciones libres observadas ($\varepsilon_{obs.}$) y las deformaciones restringidas observadas ($\varepsilon_{const.}$). En la Figura 1.7e se observa que las $\varepsilon_{const.}$ tienden a ser uniformes y las deformaciones restringidas a compresión ocurren cuando las deformaciones libres son mayores a las observadas. Lo contrario sucede para las deformaciones restringidas a tensión. De la misma figura, se puede deducir que:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{obs} + \varepsilon_{const} = \varepsilon_{obs} + \varepsilon_{ext} + \varepsilon_{int} \quad (1.4)$$

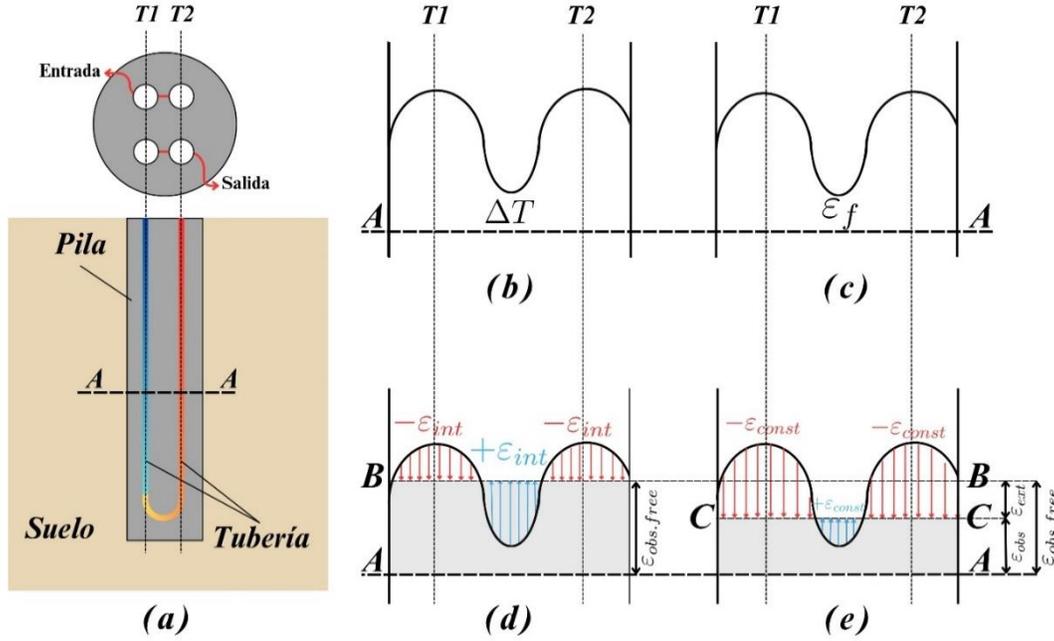


Figura 1.7 Dos dominios del comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía: a) Vista general de la pila y el suelo, b) Cambio de temperatura que ocurre en el corte transversal A-A, c) Deformaciones térmicas libres debidas al cambio de temperatura en b), d) Deformaciones internamente bloqueadas y deformaciones térmicas observadas en una pila libre, e) Deformaciones restringidas y deformaciones observadas en una pila embebida en el suelo (adaptado de Abdelaziz y Ozudogru, 2016a)

Los esfuerzos térmicos (σ_{th}) en cualquier punto de la sección transversal de la pila están dados por:

$$\sigma_{th} = \varepsilon_{const} E_{pile} \quad (1.5)$$

donde E_{pile} es el módulo de elasticidad de la pila de energía. Así, sabiendo que las deformaciones restringidas están dadas por aquellas internas y externas, los esfuerzos térmicos en cualquier punto de la sección transversal pueden ser descritos en función de estas deformaciones:

$$\sigma_{th} = \sigma_{ext} + \sigma_{int} \quad (1.6)$$

donde el esfuerzo térmico interno σ_{int} está dado por las deformaciones de compatibilidad externas, y se calculan como:

$$\sigma_{int} = \varepsilon_{int} E_{pile} \quad (1.7)$$

1.5 Métodos de análisis de pilas de energía

El análisis del comportamiento termo-mecánico de pilas de energía es de suma importancia para el diseño geotécnico-estructural dado que los esfuerzos y deformaciones inducidos térmicamente en la pila pueden afectar el desempeño estructural y cambiar significativamente el comportamiento estático de la cimentación, aunque no lleguen a rebasar el estado límite de falla, como se ha discutido en los apartados anteriores. No obstante, analizar su comportamiento es fundamental para garantizar la seguridad y funcionalidad del elemento estructural.

En sus inicios, las pilas de energía fueron utilizadas empíricamente con gran éxito en países de Europa como Reino Unido, Austria y Alemania (Abuel-Naga *et al.*, 2015). Sin embargo, otros países rechazaron esta opción debido al desconocimiento sobre el impacto de las cargas térmicas y los cambios de temperatura en el desempeño estructural de la pila. Actualmente, el uso de las pilas de energía ha experimentado un crecimiento significativo en todo el mundo, gracias al desarrollo de métodos robustos y simplificados para el análisis de estas estructuras, los cuales permiten evaluar con precisión su desempeño estructural y energético. En general estos métodos se clasifican en tres grandes grupos:

- **Métodos empíricos:** Definen las condiciones límite que la pila puede alcanzar. Para ello, se calcula la variación de la carga axial suponiendo que el elemento se encuentra completamente restringido, mientras que la máxima deformación se obtiene considerando a la pila como un cuerpo libre. Sus resultados pueden ser demasiado conservadores (Barba Galdámez, 2018).
- **Métodos acoplados:** Utilizan métodos numéricos, principalmente elementos finitos o diferencias finitas, para evaluar los efectos del cambio de temperatura en la respuesta mecánica del suelo y la pila. Son capaces de considerar diversos factores de forma acoplada, como la variación de las propiedades mecánicas de los suelos con la temperatura. Para este tipo de análisis, se utilizan programas comerciales como ABAQUS, COMSOL Multiphysics, PLAXIS, Lagamine o Geostudio, los cuales permiten realizar simulaciones detalladas. No obstante, debido a sus características, este tipo de métodos requieren una gran cantidad de datos y parámetros de entrada que demandan mayores recursos de cómputo y tiempos de ejecución.
- **Métodos desacoplados:** Este procedimiento se basa en un análisis térmico y mecánico realizado de forma independiente. Se calculan las deformaciones térmicas de la pila a partir de su respuesta mecánica, utilizando el concepto de superposición para aproximar una respuesta combinada. A diferencia de los métodos acoplados, en los métodos desacoplados las propiedades del suelo y de la pila se mantienen constantes en toda su longitud y son independientes de la temperatura.

Los métodos acoplados son ideales para la modelación de las pilas de energía debido a que consideran una mayor cantidad de factores y describen con mayor precisión el

comportamiento dual de estas estructuras. No obstante, su implementación no es sencilla para el ingeniero geotecnista, ya que se requieren conocimientos especializados que van más allá de su formación inicial. Este tipo de simulaciones demanda un dominio de temas como la termodinámica, determinación de propiedades térmicas y manejo de modelos para la resolución de problemas de flujo de calor. Lo anterior representa una limitación para la adopción de esta técnica en el análisis y diseño termo-mecánico de pilas de energía. Sin embargo, el desarrollo y mejoramiento de los métodos desacoplados se vislumbran como una alternativa al modelado numérico, ya que son más sencillos y requieren menos recursos computacionales.

1.5.1 Análisis desacoplado de pilas de energía con métodos de transferencia de cargas termo-mecánicas

Los métodos de transferencia de carga termo-mecánicos son un tipo de análisis desacoplado de pilas de energía. Son muy conocidos y usados en la práctica ingenieril actualmente. Knellwolf *et al.* (2011) desarrollaron las bases del método de transferencia de carga termo-mecánico para estimar el comportamiento de pilas de energía sujetas a distintos cambios de temperatura. Chen y McCartney (2017) realizaron un ajuste de los parámetros de ese modelo para evaluar su influencia y sus efectos con distintas condiciones de frontera en suelos no plásticos, proporcionando un modelo más completo y eficiente. Recientemente, Feng *et al.* (2024) desarrollaron una propuesta que optimiza los modelos existentes considerando las deformaciones del suelo y el comportamiento mecánico en la interfaz suelo-pila. Lo anterior evidencia el progreso continuo en las técnicas de análisis desacoplados, las cuales permiten simular más factores y ofrecen modelos cada vez más completos. Aunque estos modelos tienen ciertas limitaciones y pueden subestimar los efectos del cambio de temperatura en el comportamiento termo-mecánico de pilas de energía, destacan por su capacidad para ofrecer resultados precisos. Además, simplifican el análisis de dichos elementos al optimizar tanto el tiempo como los recursos computacionales.

El método base de transferencia de carga para pilas de energía, desarrollado por Knellwolf *et al.* (2011), incorpora los esfuerzos y deformaciones térmicos adicionales, adaptando el método para pilas convencionales formulado por Coyle y Reese (1966). Asimismo, utiliza las curvas de transferencia de carga propuestas por Frank y Zhao (1982) que describen los esfuerzos movilizados para un desplazamiento vertical dado en el fuste ($t_s - z$) y en la base ($t_b - z$) de la pila, como se muestra en la Figura 1.8.

Estas curvas constan de dos partes lineales con pendientes K y una parte constante igual al valor último de la capacidad de carga por fricción (q_s) o por punta (q_b). Las pendientes permanecen constantes hasta un valor equivalente a la mitad de la capacidad de carga q_s y q_b según sea el caso. A partir de este punto, el valor de la pendiente para cada caso es $K/5$ hasta alcanzar el valor máximo de la capacidad de carga, en donde la resistencia movilizada (t) se vuelve constante en este mismo valor. Para encontrar el valor de la pendiente de la

primera parte lineal, donde las deformaciones del suelo son elásticas, se tienen las siguientes expresiones (Frank y Zhao, 1982):

$$K_s = \frac{\alpha_s E_M}{D} \quad y \quad K_b = \frac{\alpha_b E_M}{D} \quad (1.8)$$

donde E_M es el módulo de Menard, D es el diámetro de la pila, K_s y K_b son las pendientes para el fuste y la base, respectivamente. $\alpha_s = 2$ y $\alpha_b = 11$ para suelos cohesivos, y $\alpha_s = 0.8$ y $\alpha_b = 4.8$ para suelos granulares.

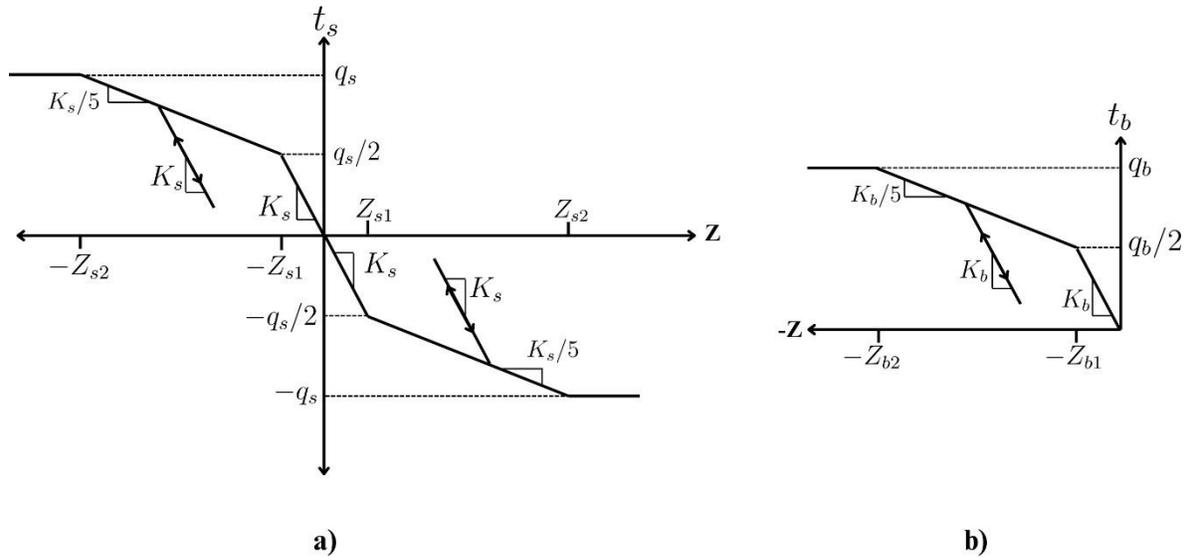


Figura 1.8 Curvas de transferencia de carga: a) evolución de la resistencia a la fricción movilizada (t_s) respecto al desplazamiento de la pila, b) evolución de la reacción en la base movilizada (t_b) respecto al desplazamiento de la pila (adaptado de Knellwolf *et al.*, 2011)

Para calcular las deformaciones de la pila el modelo discretiza a la estructura en una cantidad n de elementos rígidos conectados por resortes, como se muestra e la Figura 1.9, que representan la rigidez de la pila y que mantienen una interacción elastoplástica con el suelo circundante y la reacción del sustrato en la base de la cimentación. Esta discretización permite considerar suelos con diferentes propiedades y su variación con la profundidad. Asimismo, incluye un resorte unido a la cabeza de la pila para representar la restricción de la superestructura que solo se considera cuando la carga térmica es aplicada por el efecto de expansión que genera en calefacción. Este resorte adicional tiene una rigidez constante K_h y la resistencia en la cabeza es igual a $t_h = K_h * z$.

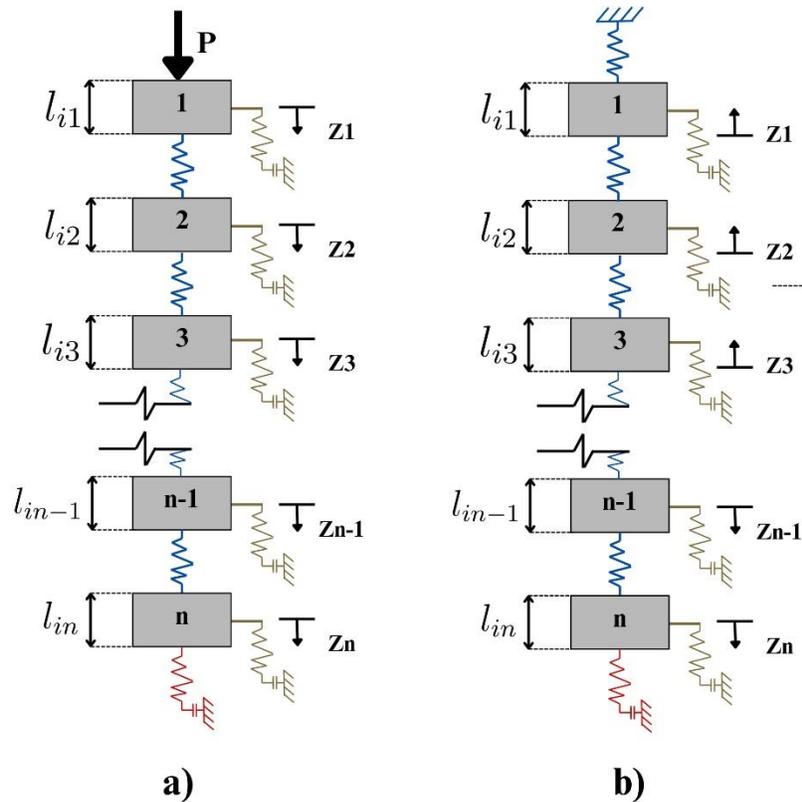


Figura 1.9 Modelo de diferencias finitas para una pila de energía: a) modelo para la carga mecánica y b) modelo para la carga térmica. Para ambos incisos z_i es desplazamiento del segmento i de la pila (adaptado de Knellwolf *et al.*, 2011)

El modelo propuesto por Knellwolf *et al.* (2011) se simula tomando en cuenta lo siguiente:

- I. El cálculo del desplazamiento de la pila se realiza bajo un esquema de diferencias finitas en una dirección, por lo que solo se consideran los desplazamientos axiales. Los desplazamientos radiales y sus interacciones mecánicas con el suelo son despreciadas.
- II. Las propiedades de la pila como el módulo de Young (E_{pile}) y el coeficiente de expansión térmica (α) se consideran constantes a lo largo de la pila y no cambian con la temperatura. El peso del elemento es despreciado.
- III. Las relaciones entre la fricción del fuste/desplazamiento del fuste, esfuerzos en la cabeza, desplazamientos en la cabeza y esfuerzos en la base/desplazamientos en la base son conocidas.
- IV. Las propiedades del suelo y la interacción suelo-pila no cambian con la temperatura.
- V. Todos los efectos térmicos de la pila se calculan suponiendo que el cambio de temperatura es uniformemente en todo el volumen del elemento.

1.6 Consideraciones para el análisis térmico de pilas de energía

La función principal de los Sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado del espacio (HVAC, *Heating, Ventilation and Air Conditionig* por sus siglas en inglés) como lo pueden ser las pilas de energía, es que genere y mantenga el confort para las personas que habitan un espacio. Un dimensionamiento inapropiado del equipo requerido limita al sistema para lograr su objetivo generando un consumo excesivo de energía que puede elevar su costo y aumentar su impacto ambiental. Por eso, el cálculo de las cargas térmicas máximas de calentamiento y enfriamiento es de gran importancia para el dimensionamiento del sistema y es el punto de partida para el diseño termo-mecánico de las estructuras termoactivas.

El análisis térmico en las estructuras termoactivas es esencial para el diseño del sistema de intercambio de calor geotérmico y existen diversos factores que se deben tomar en cuenta para llevarlo a cabo. Mohamad *et al.* (2021) resumen los factores fundamentales que determinan el diseño térmico de las pilas de energía como se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Parámetros que afectan el diseño de las pilas de energía (adaptado de Mohamad *et al.*, 2021)

Componente	Parámetro
Pila	Longitud diámetro
Tubería	Configuración Numero de tubos Espaciamiento Propiedades térmicas
Suelo	Flujo de agua subterránea Estratigrafía Propiedades térmicas
Concreto	Mezcla y volumen Propiedades térmicas
Fluido	Tasa de flujo Tipo de líquido o mezcla

La determinación de las propiedades térmicas de los componentes del sistema de intercambio de calor es importante debido a que el fenómeno de la transferencia de calor sucede través de ellos y depende directamente de estos parámetros. Entre las más importantes se encuentran la conductividad térmica (λ), que describe la capacidad de un material para conducir el calor (q) con un gradiente de temperatura por metro ($\frac{dT}{dx}$) y se expresa como:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.9)$$

La capacidad calorífica es la energía que un material requiere para aumentar en un grado su temperatura. Esta propiedad puede expresarse por unidad de volumen, denominándose capacidad calorífica volumétrica c_{cv} ($J/m^3 \circ K$) o por unidad de masa como capacidad calorífica específica, c_{ce} ($J/kg \circ K$). Su relación está dada por la densidad (ρ):

$$\rho = \frac{c_{cv}}{c_{ce}} \quad (1.10)$$

La difusividad térmica (D) es la velocidad con la que el calor se propaga en el material. Se define como la relación entre la conductividad térmica (λ) y la capacidad calorífica volumétrica (c_{cv}):

$$D = \frac{\lambda}{c_{ce}\rho} \quad (1.11)$$

El coeficiente de expansión térmica (α) es una tasa del cambio de longitud (L), área (A) o volumen (V) (deformación, ε) de un material debido a un cambio de temperatura (ΔT):

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T} = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) / \Delta T \quad (1.12)$$

La relevancia del coeficiente de expansión térmica radica en la relación directa que tiene con el cambio de temperatura y el cálculo de las deformaciones térmicas de la pila de energía, como se discutió en el apartado 1.4.1. Dicho cambio de temperatura se obtiene a partir de la respuesta térmica, implementando diferentes modelos de flujo de calor aplicados a pilas de energía (apartado 2.1).

Para determinar la respuesta térmica de las pilas de energía se utilizan adaptaciones de los modelos numéricos y analíticos que aplican en pozos geotérmicos, ya que fueron inicialmente desarrollados y aplicados en el diseño de estos. Eskilson (1987) propone las bases para el análisis del flujo de calor en pozos geotérmicos con el desarrollo de las llamadas funciones G. Estas funciones proporcionan un cambio de temperatura normalizado del suelo en el borde del pozo o pila y en el concreto del intercambiador de calor como una función del número de Fourier, resultado de un flujo de calor constante (Claesson y Eskilson, 1988; Loveridge y Powrie, 2013).

Algunos estudios indican que la respuesta térmica de un pozo intercambiador de calor, y análogamente de una pila de energía, se puede describir como un cambio de temperatura en

la estructura y en el suelo circundante (Claesson y Eskilson, 1988; Lamarche y Beauchamp, 2007). En el primero, por los materiales y componentes que lo conforman, y en el segundo por la influencia del contacto directo con el elemento. De acuerdo con Li *et al.* (2016), el problema de la transferencia de calor en intercambiadores de calor geotérmicos puede ser expresado como:

$$q_l = \frac{T_f(t) - T_{s,0}}{R(t)} = \frac{\Delta T}{R(t)} \quad (1.13)$$

donde T_f es la temperatura promedio del fluido circulante, $T_{s,0}$ es la temperatura del suelo inalterado, q_l es el flujo de calor transferido por unidad de tiempo por unidad de longitud (W m^{-1}), y R es la resistencia térmica total (mK W^{-1}), que toma en cuenta la resistencia de la tubería, el fluido y el concreto, aunque de acuerdo a diferentes modelos de análisis térmicos y según sea el objeto de estudio (que puede ser el fluido caloportador, el suelo o la pila), estas resistencias se tomarán en cuenta o incluso algunas pueden omitirse (Loveridge y Powrie, 2013).

Dado que $R(t)$ es dependiente del tiempo, los modelos analíticos la descomponen en dos partes para simplificar el análisis (soluciones convencionales), una independiente y otra dependiente del tiempo. Esta última se debe a la resistencia térmica en un estado no estacionario y se define mediante funciones G. El término dependiente puede entenderse como la respuesta de temperatura en el suelo debida a un cambio unitario del flujo de calor en un estado no estacionario. De esta manera, el problema de transferencia de calor queda como:

$$\Delta T = q_l R(t) = q_l [R_s + G(x, t)] \quad (1.14)$$

donde x es la ubicación en un sistema coordenado del punto de estudio que toma en cuenta la profundidad z , R_s es la parte independiente del tiempo de la resistencia térmica y que depende del punto de interés (x), y $G(x, t)$ es la función-G descrita por algún modelo analítico (ver apartado 2.1) dependiente del tiempo y de x (para un punto del suelo) o de r , distancia radial (para un punto dentro del pozo o pila).

Con el avance técnico de los últimos años basado en el trabajo de Eskilson, la combinación de modelos analíticos y numéricos ha dado paso a diferentes modelos simplificados que hacen uso de funciones G adaptadas a las necesidades del problema. Así, los modelos analíticos pueden considerar al pozo (en este caso la pila) como una línea fuente de calor de longitud finita, ya que con las condiciones de frontera establecidas en la superficie (como el de la temperatura) se desarrolla un estado térmico establecido a largo plazo, mismo que facilita el estudio del fenómeno del calor en las estructuras termoactivas. Aunque también puede ser considerado con una longitud infinita, cilíndrico sólido o hueco, o compuesto como se describe en el apartado 2.1, donde cada modelo tiene sus propias hipótesis.

Los métodos numéricos (diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos) son adecuados y se encuentran suficientemente desarrollados para el análisis térmico, considerando varios factores y diferentes mecanismos de transferencia de calor (conducción y convección). Sin embargo, estos modelos consumen una cantidad de tiempo importante y tienen altos costos de ejecución, respecto a los métodos analíticos (Tabla 2.1). Estos últimos son más eficientes en tres aspectos: tiempo, economía y cálculo computacional, por lo que son una alternativa más práctica. Además, se han validado con base en distintos estudios que presentan resultados similares entre las simulaciones numéricas y los datos obtenidos en campo (Philippe *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2016).

Dependiendo del caso de estudio se debe considerar la geometría del elemento, las condiciones del medio y la temperatura, los estados y valores de carga térmica, las características de los componentes que conforman al sistema (Tabla 1.3), sus propiedades térmicas y los dominios de análisis. Por lo tanto, la elección de las funciones G y el tipo de modelo debe adecuarse a todos estos factores para obtener resultados aproximados a las características del problema como un conjunto.

1.7 Diseño termo-mecánico de las pilas de energía

En el mundo apenas existen algunas guías que describen de forma aproximada los efectos causados por el acoplamiento de las cargas mecánicas y térmicas para el diseño de las pilas de energía, como las de Suiza, Reino Unido y recomendaciones en Francia basados en las normas europeas (también llamadas Eurocódigos). Sin embargo, estas consideraciones generales no incluyen aspectos relevantes para el diseño geotécnico y estructural, están limitados a casos específicos de diseño y consideran las condiciones que representan el peor escenario o subestiman los efectos de las cargas térmicas (Rotta Loria *et al.*, 2020). Lo anterior se basa en métodos conservadores para estar del lado de la seguridad ya que no se conocían ni estudiaban bien los efectos de las cargas térmicas en pilas de energía, no obstante, es algo que actualmente se pretende mejorar gracias al desarrollo de nuevos métodos para el análisis del comportamiento termo-mecánico de estas estructuras.

Ante la necesidad de evaluar detalladamente la respuesta termo-mecánica para prevenir consecuencias indeseables, Bourne-Webb *et al.* (2016) presentó un esquema (Figura 1.10) sobre la metodología para llevar a cabo el diseño integral de una estructura termoactiva, considerando la interacción entre el análisis térmico y geotécnico como un proceso iterativo de revisión conjunta de los resultados de un campo y otro, con el fin de garantizar la seguridad y el funcionamiento de las estructuras.

Para simular adecuadamente el comportamiento térmico de una estructura termoactiva se debe caracterizar la interacción suelo-bomba de calor considerando la influencia de diversos factores como: la interacción entre sus componentes, sus propiedades térmicas, los tiempos de ejecución y la precisión de los resultados. Por otra parte, para llevar a cabo un modelo geotécnico-estructural apropiado se debe considerar el comportamiento acoplado de los

efectos térmicos y mecánicos a los que el elemento es sometido. Lo anterior se traduce en un problema de complejidad considerable, no solo por el acoplamiento de los efectos, sino porque cada campo, geotécnico-estructural y térmico, involucra una serie de problemáticas y cuestiones propias que deben ser atendidas. Desde la perspectiva geotécnica-estructural existen cuestiones como: si los efectos mecánicos debido a las cargas térmicas provocan la falla, si se debe y puede modificar el diseño estructural dados esos efectos, cómo hacerlo manteniendo el suministro de energía logrado por el diseño térmico, entre otros. En el caso térmico se deben estudiar cuestiones como: cuánto es el máximo de energía que puede ser extraída, cómo diseñar el sistema de intercambio de calor, si se satisface la demanda energética, si no se satisface, si se puede o no alterar el diseño estructural para satisfacer la demanda energética, entre otros. Por ello, esquemas de diseño, como el de la Figura 1.10, resultan ser una referencia invaluable, ya que resumen cómo cada problema específico debe ser abordado de manera integral.

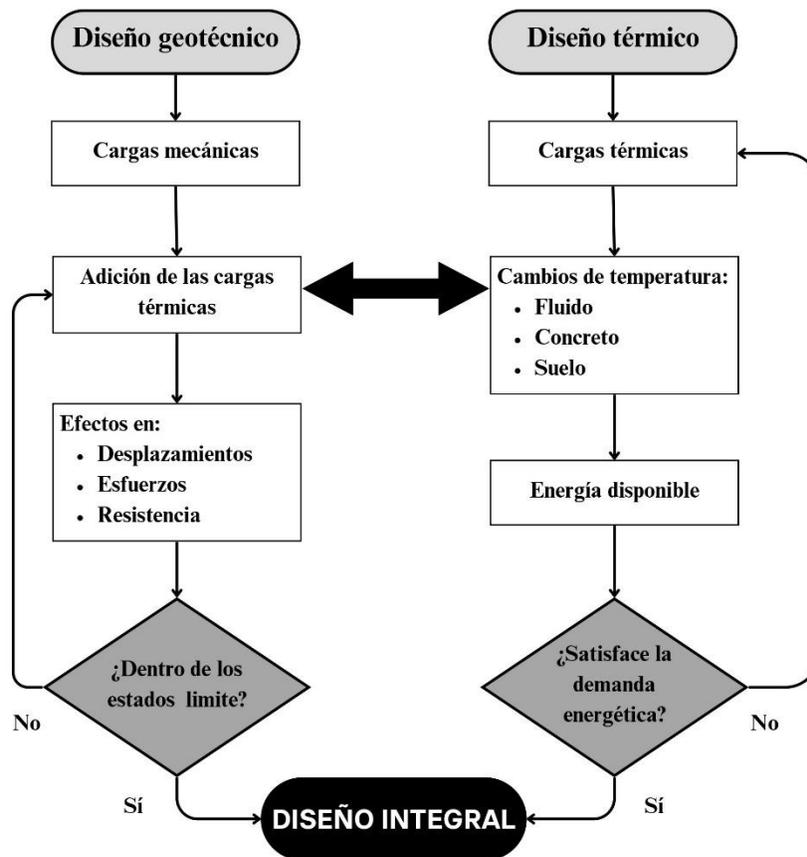


Figura 1.10 Interacciones entre el proceso de diseño geotécnico y térmico (adaptado de Bourne-Webb *et al.*, 2016)

Es importante mencionar que los resultados de la variación de temperatura en el diseño térmico representan las condiciones de frontera, que sirven como parámetro de entrada en el diseño geotécnico-estructural, para obtener los esfuerzos y deformaciones adicionales

causados por las cargas térmicas. Así, se consideran los efectos de la carga mecánica del edificio y los efectos del cambio de temperatura para caracterizar la respuesta termo-mecánica del elemento y revisar los estados límite, determinando si la estructura puede soportar adecuadamente las cargas termo-mecánicas. En este sentido, determinar los cambios de temperatura que se presentan en la pila resulta de especial interés para el ingeniero geotecnista.

Por lo anterior, las cuestiones más importantes sobre el análisis térmico tratan sobre qué cambio de temperatura considerar para el diseño termo-mecánico de pilas de energía y cómo obtenerlo. Al respecto, Abdelaziz y Ozudogru (2016b) demostraron, con un estudio del comportamiento termo-mecánico de una pila de energía sujeta a cargas térmicas transitorias, que el promedio de los cambios de temperatura presentados en la sección transversal de la pila se ajusta mejor a su respuesta termo-mecánica. Otros autores sugieren el uso de un cambio de temperatura representativo, refiriéndose a un valor promedio de temperatura que caracterice la respuesta térmica en todo el volumen del elemento (Song *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2002).

Por otra parte, para determinar el cambio de temperatura existen diferentes métodos, como los modelos numéricos o modelos analíticos. Entre estos últimos se han desarrollado propuestas novedosas basadas en el criterio de un cambio de temperatura representativo, las cuales simplifican la compleja problemática del flujo de calor y son compatibles con modelos de análisis desacoplados para el diseño termo-mecánico de las pilas de energía. Así, estas técnicas se presentan como una herramienta útil que complementa los métodos de análisis, facilitando su aplicación en la práctica ingenieril. Por ello, la utilización de estas técnicas puede contrarrestar la alta demanda de recursos y conocimientos técnicos que exige el modelado numérico.

2 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA

2.1 Modelos analíticos para el análisis de la respuesta térmica de pilas de energía

En general, los métodos analíticos para el análisis térmico de las pilas de energía son más eficientes en prácticas ingenieriles que los métodos numéricos, y actualmente se encuentran nuevas propuestas con adaptaciones a las ya existentes que permiten considerar la complejidad de los mecanismos de transferencia de calor. Asimismo, existen modelos que toman en cuenta cargas térmicas variables balanceadas y/o no balanceadas, el flujo establecido y transitorio de cargas implementado métodos de superposición como las que presenta Song *et al.* (2022) o Li *et al.* (2016) con el teorema de Duhamel.

A continuación, se resumen algunos modelos analíticos que utilizan las funciones G para el análisis térmico al interior y exterior de los intercambiadores de calor geotérmicos:

Tabla 2.1 Resumen de algunos modelos analíticos para análisis térmicos de intercambiadores de calor (adaptado de Arenas- Moreno, 2023; Li *et al.*, 2016)

Modelo	Observaciones
Modelo de fuente de línea en hélice infinita (Li y Lai, 2012)	La posición de la fuente de línea en hélice es descrita por una ecuación helicoidal.

Continuación: Tabla 2.1 Resumen de algunos modelos analíticos para análisis térmicos de intercambiadores de calor (adaptado de Arenas- Moreno, 2023; Li *et al.*, 2016)

Modelo	Observaciones
Modelo de fuente de línea infinita (Ingersoll <i>et al.</i> , 1955)	<ul style="list-style-type: none"> - Es fácil de aplicar para tratar con factores relevantes como la superficie del suelo flujo de filtraciones. - Análisis térmico en 1-D. - No simula el proceso térmico en el interior de la pila. - Tiene cierto sesgo conservador en un análisis a largo plazo. - Supone que no alcanza un flujo de calor estacionario.
Modelo de fuente de línea finita (Zeng <i>et al.</i> , 2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Es recomendable para predecir las respuestas térmicas a largo plazo. - Análisis térmico en 2-D. - Configuración sencilla en U. - Considera la superficie del suelo. - La función depende de la profundidad (z), por lo que se requiere una doble integración para determinar la temperatura promedio en la pared del pozo intercambiador. - Considera la interacción térmica entre pozos adyacentes. - Considera la longitud de la pila como finita. - Tiene cierto sesgo para un análisis de corto plazo. - Supone que alcanza un flujo de calor estacionario.
Modelo de fuente de línea móvil infinita (Diao <i>et al.</i> , 2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Este modelo atiende el efecto de la velocidad característica del agua subterránea y la respuesta del pozo.
Modelo de fuente de línea de cambio de fase (Ingersoll <i>et al.</i> , 1955)infinito	<ul style="list-style-type: none"> - Es el único modelo que responde a la problemática de la formación de hielo.

Continuación: Tabla 2.1 Resumen de algunos modelos analíticos para análisis térmicos de intercambiadores de calor (adaptado de Arenas- Moreno, 2023; Li *et al.*, 2016)

Modelo	Observaciones
Modelo de fuente cilíndrica solida infinita (Man <i>et al.</i> , 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - Denota la posición radial de la fuente de superficie cilíndrica. - No simula el proceso térmico al interior de la pila - Análisis térmico en 1-D o 2-D. - La pila se modela como un cilindro relleno del suelo, al cual se le asignan las propiedades del sitio - Considera la interacción térmica entre pozos adyacentes. - El espesor, la masa y la capacidad calorífica de la fuente de calor se desprecian. - El flujo de calor por longitud de la fuente cilíndrica q_l es constante desde el inicio. - Análisis a corto plazo y largo plazo. - Considera la longitud finita de la pila. - El modelo 2-D considera la longitud finita de la pila y una temperatura constante en la superficie durante todo el análisis. - Configuración de tubería helicoidal.
Modelo cilíndrico compuesto (Hu <i>et al.</i> , 2014)	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis térmico en 1-D - Análisis a corto plazo. - Puede simular configuraciones de tubería en U sencilla y múltiple en pilas de energía con diámetros relativamente grandes. - Considera la interacción térmica entre pozos adyacentes. - Considera la capacitancia térmica de la pila. - Se utiliza para estudiar el desempeño térmico de las pilas de energía y la validación de pruebas de respuesta térmica.
Modelo de superficie cilíndrica (Zhang <i>et al.</i> , 2014)	<ul style="list-style-type: none"> - No se modela el proceso térmico en el interior de la pila. - Análisis en 2-D. - Análisis a corto plazo. - Considera a la pila con longitud finita - Considera la interacción térmica entre pozos adyacentes. - Considera la capacitancia térmica de la pila considerándola como un cilindro relleno de suelo.

Al utilizar alguno de los modelos anteriores se deben de tener en cuenta algunas suposiciones. Li *et al.* (2016) detalla las más importantes, que se siguen utilizando hasta la fecha:

- I. El suelo debe tener una extensión finita o infinita, dependiendo de la influencia del clima en la superficie.
- II. El suelo tiene una temperatura inicial uniforme (temperatura inalterada del suelo). Si la superficie se considera en el análisis, la temperatura inicial puede ser usada como una condición de frontera constante para la superficie.
- III. La condición de frontera para la pared del pozo o de la tubería intercambiadores de calor se puede establecer como un flujo o temperatura constantes, donde considerar el flujo constante es más conveniente.
- IV. Si no se puede prescindir del flujo de agua subterránea, el flujo debe ser considerado como homogéneo y paralelo a la superficie.
- V. El medio es homogéneo. Si la estratigrafía del suelo no es homogénea, esta puede ser considerada con una conductividad térmica equivalente, con una expresión de cálculo dependiendo la orientación de la estratigrafía (vertical o horizontal)
- VI. El proceso de transferencia de calor se considera por conducción.

La elección de un modelo debe adecuarse a las características del caso de estudio, tomando en cuenta los factores más relevantes que influyen en su diseño térmico y mecánico. Para el cálculo de los cambios de temperatura representativos dentro una pila de energía, los modelos que se presentan en la sección 2.2 se basan en el modelo de fuente lineal finita (FLSM, *Finite Line Source Model* por sus siglas en inglés) propuesto por Zeng *et al.* (2002).

2.1.1 Modelo de fuente lineal finita (FLSM)

El modelo de fuente lineal finita considera al pozo o pila como una fuente de calor lineal de longitud finita, ya que el diámetro del elemento es menor comparado con su longitud o profundidad (respecto a la superficie), y al ser finito, considerando una temperatura constante del suelo, logra un estado establecido del flujo de calor.

El modelo presentado por Zeng *et al.* (2002) considera una fuente lineal imaginaria, simétrica respecto a la superficie (Figura 2.1), con la misma longitud H que la fuente lineal real, pero con una tasa de calor negativa $-q_l$. Lo anterior permite verificar que se cumpla la condición de frontera $T(r, z, t) = 0$, si se define a la ecuación 2.1 como igual a $t - t_0$.

Este modelo considera las mismas hipótesis que otros métodos, con sus particularidades, como se describe a continuación:

- I. El suelo se considera un medio homogéneo y semi-infinito.
- II. El medio tiene una temperatura inicial, t_0 .
- III. La frontera del medio (superficie del suelo) mantiene una temperatura constante durante el periodo de análisis.

CAPÍTULO 2

- IV. La dimensión radial del pozo es despreciada, por lo que se considera como una fuente lineal desde la frontera (superficie) hasta una cierta profundidad (H).
- V. La tasa de calor por longitud q_l es constante desde un momento inicial $t = 0$.

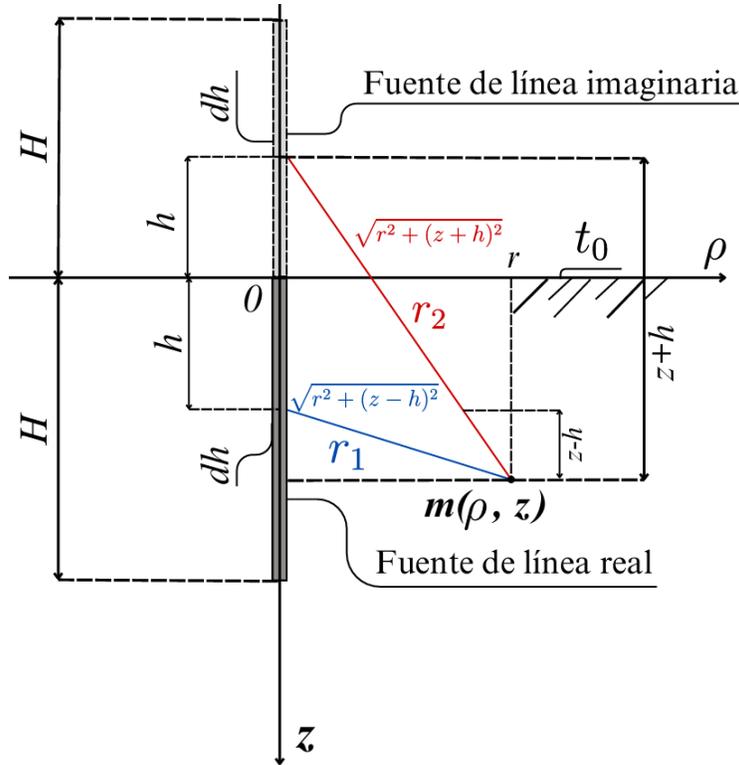


Figura 2.1 Geometría del sistema de fuente de línea finita (adaptado de Zeng *et al.*, 2002)

La expresión matemática que describe la temperatura que se manifiesta en un punto (ρ, z) del suelo, producto de un flujo de calor constante por unidad de longitud (q_l), a partir de la longitud H del elemento, a una profundidad z desde la superficie del suelo, viene dada por:

$$T(r, z, t) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{\rho^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}} \right]}{\sqrt{\rho^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{\rho^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}} \right]}{\sqrt{\rho^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (2.1)$$

donde ρ es la distancia radial, z es la profundidad por debajo del suelo, t es la duración de la transferencia de calor, q_l es el flujo de calor por unidad de longitud de la pila (e independiente del tiempo), λ es la conductividad térmica del medio, α es el coeficiente de difusividad térmica del suelo, $\operatorname{erfc}(x)$ es la función complemento de error.

De acuerdo con Brandl (2006), la función de error puede ser calculada como:

$$\operatorname{erfc}(\xi) = 1 - \operatorname{erf}(\xi) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\bar{\omega}^2} d\bar{\omega} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} e^{-\bar{\omega}^2} d\bar{\omega} \quad (2.2)$$

donde ξ es el límite de integración y $\bar{\omega}$ es la variable de integración respectiva.

Este modelo presenta algunas observaciones importantes, que se mencionan a continuación:

- I. Describe de manera más adecuada y mejorada el proceso de conducción del calor en pozos verticales de intercambio de calor en un análisis de largo plazo, también aplicable a pilas de energía.
- II. Establece la importancia de una temperatura representativa que caracterice la temperatura de la pared del pozo (o pila).
- III. Propone que la temperatura representativa en la pared del pozo sea a aquella que se encuentra a la mitad de su longitud o aquella que tome en cuenta toda su longitud, probando que es más razonable que se elija un criterio basado en esta última propuesta, aunque es más difícil su cálculo.
- IV. Denota la importancia de tomar en cuenta la influencia de cargas térmicas no balanceadas durante el diseño térmico del sistema intercambiador de calor, ya que estas condiciones pueden deteriorar el desempeño con el pasar del tiempo.

2.2 Modelos para la determinación de los cambios de temperatura representativos en pilas de energía

Se presenta a continuación un modelo analítico que tiene el propósito de establecer un procedimiento más simplificado al problema de la transferencia de calor para obtener el cambio de temperatura representativo usado en el diseño termo-mecánico de las pilas de energía. Este procedimiento considera al modelo FLSM (*Finite Line Source Model*, por sus siglas en inglés), descrito con anterioridad, para obtener la respuesta térmica de la pila.

Song *et al.* (2022) proponen un modelo analítico para la obtención de la respuesta térmica de pilas de energía. Este modelo se validó comparando los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas del comportamiento termo-mecánico y los datos obtenidos a partir de una prueba de laboratorio y una de campo (Laloui *et al.*, 2003).

El modelo analítico de Song *et al.* (2022) se basa en el mecanismo de transferencia de carga estudiado por Bourne-Webb y Bodas Freitas, (2020) y Rotta Loria *et al.* (2020) suponiendo que la temperatura en las secciones transversales de la pila y su profundidad cambia de manera uniforme. Aunque el cambio de temperatura no es uniforme debido a la variación continua de las cargas térmicas por la demanda operacional de la edificación (Abdelaziz y Ozudogru, 2016a), en otro estudio anterior se demostró que la respuesta térmica promedio en las secciones transversales de la pila describe mejor el comportamiento termo-mecánico de estas (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b). Así, los autores propusieron una analogía en tres

dominios para comprender la interacción entre la superestructura, la pila y el suelo (Figura 2.2).

Con base en lo anterior se establece que, cuando la pila se encuentra totalmente libre, las deformaciones inducidas por el cambio de temperatura se distribuyen de forma variable en la sección transversal de la pila (Figura 2.2b y Figura 2.2c). No obstante, y a pesar de tener una distribución no uniforme, cualquier sección transversal a lo largo del elemento tiene una deformación uniforme debido a la compatibilidad de deformaciones. Por lo tanto, la deformación de la sección transversal de la pila se ajusta equivalentemente al promedio de la deformación térmica (ε_{free}^{th} , región sombreada), como se ilustra en la Figura 2.2c y la Figura 2.2d.

De esta forma, la deformación térmica promedio puede expresarse como:

$$\varepsilon_{free}^{th} = \frac{\int_{A_{pile}} \varepsilon_{free-i}^{th} da}{A_{pile}} \quad (2.3)$$

donde A_{pile} es el área de la sección de la pila. Para las regiones cerca de la tubería de los intercambiadores de calor, las deformaciones térmicas locales ($\varepsilon_{free-i}^{th}$) son significativamente mayores que las deformaciones térmicas promedio (ε_{free}^{th}). Dicha diferencia, donde las deformaciones son mayores y menores al promedio, son compensadas por compatibilidad de deformaciones.

Cuando la pila se encuentra restringida por una superestructura y/o el suelo circundante, la deformación térmica promedio está limitada por una resistencia externa. Lo que ocurre es que parte de ella se convierte en deformaciones restringidas (ε_{cons}^{th}), lo cual genera esfuerzos térmicos adicionales. Por lo tanto, la suma de las deformaciones restringidas y las observadas es igual a la deformación térmica promedio de la pila si estuviera totalmente libre (Figura 2.2e) con la división (cada parte para la ε_{cons}^{th} y ε_{obs}^{th} , respectivamente) de la región sombreada equivalente a la de la Figura 2.2d.

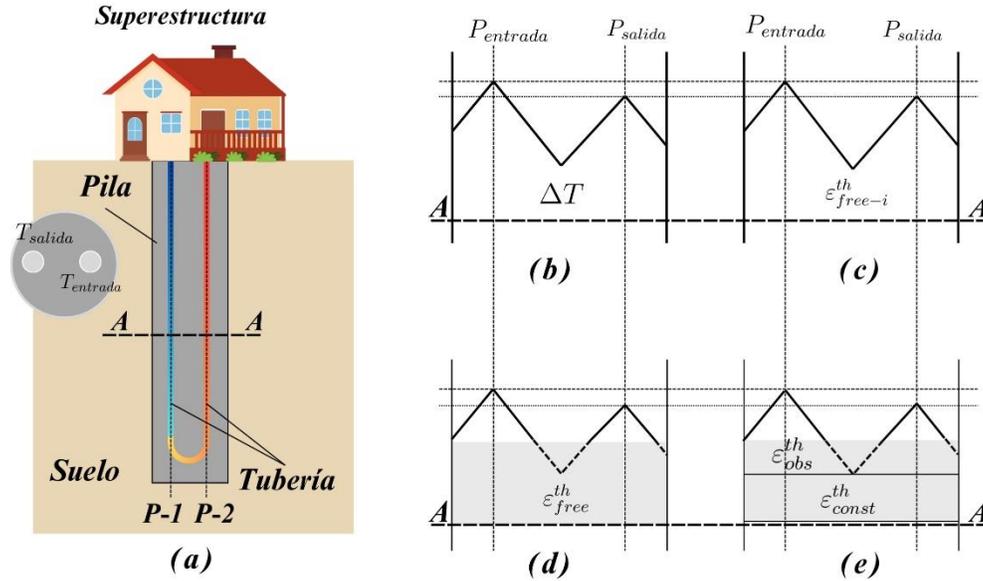


Figura 2.2 Tres dominios acoplados en el desempeño de la pila: a) diagrama general de la pila de energía, b) cambio de temperatura para la sección transversal de la pila, c) deformación térmica libre de la sección, d) deformaciones térmicas promedio, e) deformaciones restringidas y observadas (adaptado de Song *et al.*, 2022)

Posteriormente, se utiliza la expresión de la deformación térmica (ecuación 2.1) promedio con su respectivo cambio de temperatura promedio, y se considera que, el coeficiente de expansión térmica de la pila es independiente de la temperatura. Dicho fenómeno es un fundamento de los métodos unidimensionales para el estudio del desempeño termo-mecánico de la pila de energía (Bourne-Webb *et al.*, 2013). Lo anterior permite llegar a una expresión simplificada del cambio de temperatura promedio en una sección de la pila, en donde el subíndice i indica la región local en la pila:

$$\Delta T_{average} = \frac{\int_{A_{pile}} \Delta T_i da}{A_{pile}} \quad (2.4)$$

Por otra parte, para describir la respuesta de la temperatura en la pared de la pila se determina una expresión para el cálculo de los cambios de temperatura adoptando la función G del modelo FLSM (*Finite Line Source Model*, por sus siglas en inglés) (apartado 2.1.1). Este modelo supone una temperatura constante en el suelo como condición de frontera y que la pila tiene una longitud finita (Li *et al.*, 2016). De esta forma, se puede analizar la respuesta térmica de la pared de la pila respecto al tiempo y predecir los cambios en la temperatura del suelo con la profundidad, inducidos durante la operación a largo plazo:

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{q}{4\pi\lambda_{soil}} \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}} \right]}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}} \right]}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (2.5)$$

donde r es la distancia radial, z es la profundidad por debajo del suelo, t es la duración de la transferencia de calor, q es el flujo de calor por unidad de longitud de la pila (e independiente del tiempo), λ_{soil} es la conductividad térmica del suelo, α es el coeficiente de difusividad térmica del suelo, $\operatorname{erfc}(x)$ es la función complemento de error (apartado 2.1.1).

La función anterior es adecuada para obtener el cambio de temperatura bajo cargas térmicas constantes. Sin embargo, este modelo tiene un sesgo al calcular el cambio de temperatura en pilas sujetas a cargas térmicas dinámicas, mismas que ocurren en la operación real de las pilas de energía. Para superar esta limitante, Song *et al.* (2022) introduce al modelo FLSM (*Finite Line Source Model*, por sus siglas en inglés) tradicional el procedimiento de pulsos escalonados, con una extracción o inyección de calor dividida en secciones constantes y superpuestas (Figura 2.3), que considera un flujo de calor dinámico y la variación continua de las cargas térmicas.

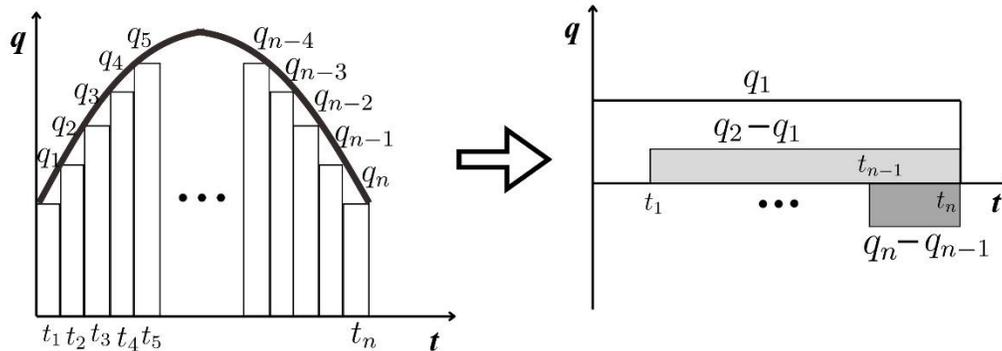


Figura 2.3 Superposición por partes escalonadas linealmente de las entradas de calor en el tiempo (adaptado de Song *et al.*, 2022)

Este procedimiento indica que, para un tiempo determinado (t_n), el efecto de las cargas es el acumulado de todas las anteriores en su respectivo tiempo ($t_n - t_{i-1}$), como se ilustra en el lado derecho de la Figura 2.3, es decir: $q_1 + (q_2 - q_1) + \dots + (q_n - q_{n-1})$. Así, la respuesta térmica de la pared de la pila en un momento específico puede ser obtenido al superponer todas las respuestas inducidas por el escalonamiento de los pulsos como se muestra matemáticamente a continuación:

$$\Delta T_{pile-wall}(z, t) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i - q_{i-1}}{4\pi\lambda_{soil}} \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r_{pile}^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha(t_n - t_{i-1})}} \right]}{\sqrt{r_{pile}^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r_{pile}^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha(t_n - t_{i-1})}} \right]}{\sqrt{r_{pile}^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (2.6)$$

donde r_{pile} es el radio de la pila y para t_0 y q_0 el valor inicial es igual a cero.

La ecuación 2.6 representa la respuesta térmica generada en la pared de la pila bajo una variación continua de las cargas térmicas, y es clave para calcular la distribución de los cambios de temperatura representativos localmente en la sección transversal de la pila.

Para determinar la transferencia de calor al interior de la pila, se considera un mecanismo radial con las resistencias térmicas de la tubería (R_{pipe}), del concreto (R_{pile}) y del suelo (R_{soil}). Dicho mecanismo se muestra en la Figura 2.4c, con el cambio de temperatura en un corte longitudinal de una pila de energía. La distribución del cambio de temperatura no es constante, pero si uniforme, y las variaciones son significativamente mayores cerca del intercambiador de calor y menores conforme se alejan de este. El fenómeno radial de transferencia por resistencia térmica puede ir de izquierda a derecha a partir del eje central la tubería de intercambio de calor equivalente, pasando primero del fluido caloportador a la pared de la tubería. Posteriormente, la transferencia de calor continúa a través del concreto y termina en el suelo circundante; o puede suceder en sentido contrario como lo indican las flechas dobles de la figura.

El concepto de diámetro equivalente está basado en el estudio realizado por O'Neal (1998), en donde se menciona que la tubería de los intercambiadores de calor (Figura 2.4a) puede ser simulada en conjunto mediante un diámetro equivalente (Figura 2.4b) para el análisis térmico de la pila. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$D_{eq} = \sqrt{n}D \quad (2.7)$$

donde D es el diámetro externo del tubo del intercambiador, y n es el número de tubos de intercambio de calor.

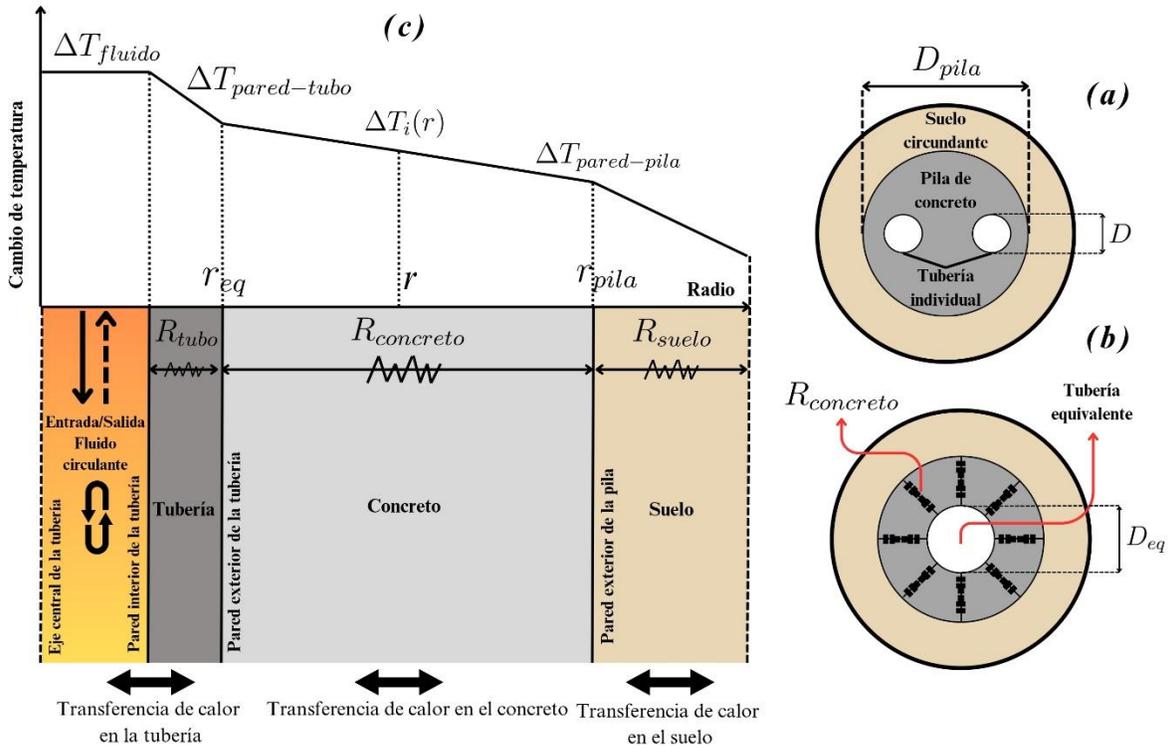


Figura 2.4 a) configuración real de la tubería de intercambio de calor en la pila, b) configuración en diámetro equivalente y c) proceso de transferencia de calor bajo un dominio (1-D) en la sección transversal de la pila (adaptado de Song *et al.*, 2022)

De esta forma, se expresa la relación que existe entre la pared de la pila y la pared externa del intercambiador de calor como:

$$\Delta T_{pipe-wall} = \Delta T_{pile-wall} + qR_{concrete} \quad (2.8)$$

De acuerdo con Bergman *et al.* (2011), $R_{concrete}$ se puede calcular como:

$$R_{concrete} = \frac{1}{2\pi\lambda_{concrete}} \ln\left(\frac{D_{pile}}{D_{eq}}\right) \quad (2.9)$$

donde $\lambda_{concrete}$ es el coeficiente de conductividad térmica de la pila y D_{pile} es el diámetro de la pila.

Finalmente, el cambio de temperatura local en cualquier punto de la sección transversal de la pila de energía al término de un determinado tiempo (t_n) se expresa como:

$$\Delta T_i(r, t_n) = \frac{q_n R_{concrete}}{r_{eq} - r_{pile}} (r - r_{pile}) + \Delta T_{pile-wall} \quad (2.10)$$

Sustituyendo la ecuación 2.10 en la ecuación 2.4, el cambio de temperatura promedio en la sección transversal de la pila se calcula como:

$$\Delta T_{average}(t_n) = \frac{1}{\pi(r_{eq} - r_{pile})} \int_0^{2\pi} \int_{r_{eq}}^{r_{pile}} \left[\frac{q_n R_{concrete}}{r_{eq} - r_{pile}} (r - r_{pile}) + \Delta T_{pile-wall} \right] * r dr d\theta \quad (2.11)$$

Para que los cambios de temperatura sean descriptivos y representativos de la pila, se realiza una integración de todos los promedios de temperatura a lo largo de todo el elemento o profundidad H (cambio integral de temperatura). Así, los cambios de temperatura representativos se calculan como:

$$\Delta T_{representative} = \frac{1}{H} \int_0^H \Delta T_{average}(r, t_n) dz \quad (2.12)$$

En la Figura 2.5 se muestra la secuencia de cálculo para la obtención de los cambios de temperatura representativos en una pila de energía.

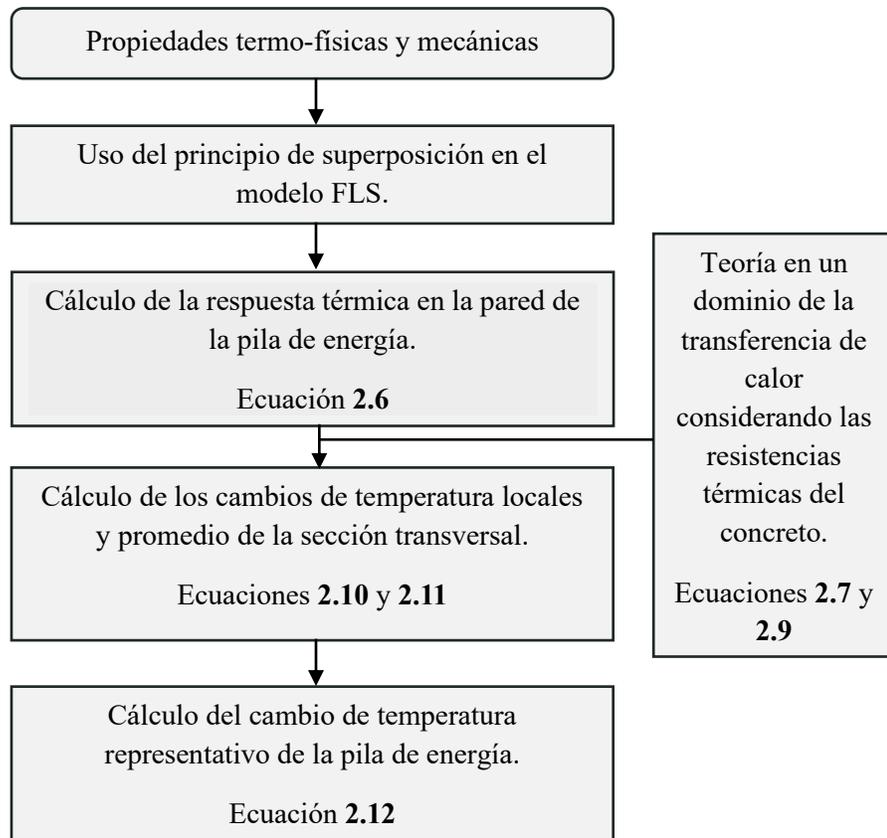


Figura 2.5 Diagrama de flujo del modelo para el cálculo del cambio de temperatura representativo de diseño de la pila de energía (adaptado de Song *et al.*, 2022)

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen con los aspectos y observaciones más importantes de este procedimiento para el cambio de temperatura representativo de diseño de las pilas de energía:

Tabla 2.2 Ventajas, desventajas, conclusiones y recomendaciones del modelo analítico para el cálculo del cambio representativo de temperatura en el diseño termo-mecánico de pilas de energía propuesto por Song *et al.* (2022)

Aspecto	Observación
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Refleja el efecto térmico de cargas térmicas variables en la pila en tiempo real. - Puede ser utilizado como base para el estudio de la interacción entre la pila y el suelo. - Es una mejora para el diseño de la pila de energía bajo un dominio (1-D). - El $\Delta T_{Representativo}$ puede ser utilizado para describir razonablemente la interacción termo-mecánica entre las restricciones y la pila.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Los valores máximos y mínimos del ΔT pueden tener cierto sesgo en el tiempo debido a que la transferencia de calor entre el suelo, la pila y el intercambiador toma su tiempo. - Entre más largo sea el lapso de los pulsos escalonados, más se reduce el tiempo de cálculo, pero también la precisión de los resultados, lo que lleva a mayores errores. - La suposición de un flujo estacionario de calor lleva a diferencias y errores de precisión en los resultados del ΔT. - En un análisis a largo plazo, la diferencia entre el $\Delta T_{promedio}$ y el $\Delta T_{promedioIntegral}$ incrementa gradualmente, lo que genera errores de la misma manera.
Conclusiones (C) y recomendaciones (R)	<ul style="list-style-type: none"> - Hay errores significativos en el $\Delta T_{Representativo}$, que muy probablemente se deban al método de superposición de los pulsos escalonados (R, para investigación). - Puede ser aplicado en un gran rango de geometrías de la pila. (R, para investigación). - El $\Delta T_{Representativo}$ está relacionado con el número de tubos intercambiadores de calor: entre mayor sea el número de tubos, más eficiente es la transferencia de calor y mayor es el $\Delta T_{Representativo}$ (C). - Refleja la influencia de la configuración de los intercambiadores de calor en el $\Delta T_{Representativo}$ (C). - El diámetro de la pila influye en la resistencia térmica de la pila: entre mayor sea el diámetro, la resistencia térmica aumenta significativamente (C). - La resistencia térmica disminuye como el número de tubos intercambiadores de calor aumente. (C)

Continuación: Tabla 2.2 Ventajas, desventajas, conclusiones y recomendaciones del modelo analítico para el cálculo del cambio representativo de temperatura en el diseño termo-mecánico de pilas de energía propuesto por Song *et al.* (2022)

Aspecto	- Observación
Conclusiones (C) y recomendaciones (R)	<ul style="list-style-type: none"> - El $\Delta T_{Representativo}$ varía mucho con un numero grande de tubos intercambiadores para un diámetro pequeño de la pila. (C) - El $\Delta T_{promedioIntegral}$ es más representativo que el $\Delta T_{promedio}$ en la sección transversal de la pila. (C)

2.2.1 Análisis del impacto de la resistencia térmica del concreto en el cambio de temperatura representativo de pilas de energía

Este análisis tiene el propósito de establecer los efectos en el cambio de temperatura representativo de las pilas de energía con base en la expresión de resistencia térmica del concreto (ecuación 2.9) utilizada en el método analítico propuesto por Song *et al.* (2022). Dicha ecuación está afectada por el diámetro de la pila y la cantidad de tubos de intercambio de calor al interior de esta.

Primero, es importante saber que existen diferentes formas de calcular la resistencia térmica del concreto para el diseño de intercambiadores de calor. La Tabla 2.3 reúne algunos modelos propuestos en la literatura internacional para estimar esta resistencia térmica. El modelo que se analiza en este apartado (ecuación 2.9), modelo de la fila dos de la Tabla 2.3) está afectado por tres parámetros: la conductividad térmica del concreto, el diámetro de la pila y el diámetro de la tubería equivalente en su interior.

Tabla 2.3 Modelos para estimar la resistencia térmica del concreto (adaptado de Arenas Moreno, 2023)

Ecuación	Observaciones
$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \left(\frac{r_b}{r_p} \sqrt{\frac{r_p}{D}} \right)$	Para tuberías en U consideradas como un diámetro equivalente.
$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln \left(\frac{r_b}{\sqrt{nr_p}} \right)$	Considera un diámetro equivalente de la tubería con base en la cantidad n de tubos.
$R_b = \frac{1}{\beta_0 \lambda_0 \left(\frac{r_b}{r_p} \right)^{\beta_1}}$	Utiliza el factor de forma con ajuste de datos experimentales.
$R_b = \frac{H}{C_f V_f} \left(\frac{T_{in} - T_b}{T_{in} - T_{out}} - \frac{1}{2} \right)$	Considera la temperatura de entrada y salida del fluido caloportador.

Segundo, se pueden proponer algunas estimaciones sobre el comportamiento de la resistencia térmica del concreto y su impacto en el cambio de temperatura representativo de las pilas de energía (ecuación 2.10), variando el diámetro de la pila y el número de tubos en su interior como (Figura 2.6):

- I. Más tubos, menor R_c y mayor ΔT
- II. Menos tubos, mayor R_c y menor ΔT
- III. Mayor diámetro, mayor R_c y menor ΔT
- IV. Menor diámetro, menor R_c y mayor ΔT

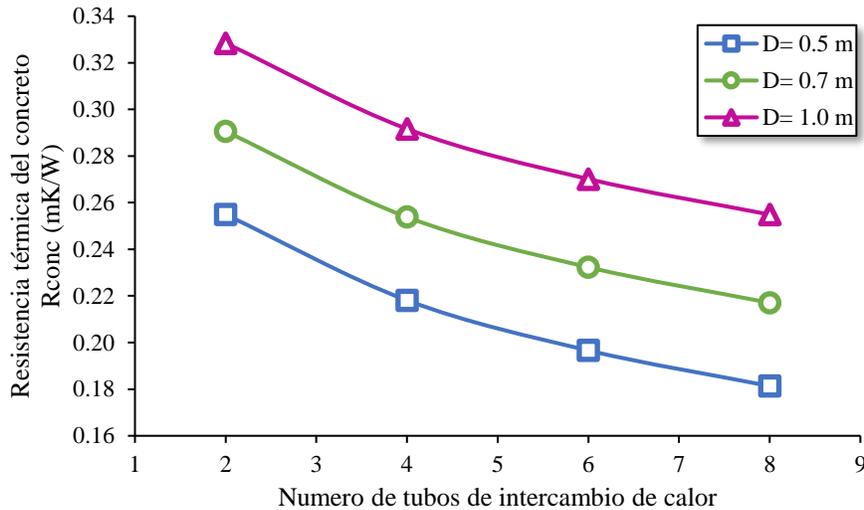


Figura 2.6 Comparación de la resistencia térmica del concreto para diferente diámetro de pila y diferente número de tubos de intercambio de calor en su interior (adaptado de Song *et al.*, 2022)

Por último, los efectos en la resistencia térmica del concreto y su impacto en el cambio de temperatura representativo mencionados anteriormente no cambian si varía la configuración del circuito primario en la pila. El objetivo de este criterio para estimar la resistencia térmica del concreto es tomar en cuenta el número de tubos sin importar su configuración, razón por la cual puede ser aplicado a diferentes tipos de tubería (Song *et al.*, 2022). Sin embargo, es importante proponer una cantidad de tubos adecuada cuando la configuración de la tubería no permita obtener este número directamente, por ejemplo, las configuraciones en serie o espiral que son en realidad un único tubo de longitud L . Al aplicar la expresión 2.7 se considera que cada tubo n tiene la misma longitud de la pila. Así, una forma sencilla de obtener la cantidad de tubos, en casos como los mencionados, consiste en obtener la relación inversa entre la longitud L del tubo único y la longitud de la pila.

2.3 Método de transferencia de carga para la revisión del comportamiento termo-mecánico de pilas de energía

El método que se presenta a continuación fue calibrado por Arizmendi (2021) con base en el trabajo de Chen y McCartney (2017) que parte de las consideraciones teóricas mencionadas

en el apartado 1.5.1. El algoritmo de cálculo se divide en tres módulos: carga mecánica, carga térmica y carga termo-mecánica.

En este caso, se considera que la pila se encuentra sujeta a una carga mecánica P y cada elemento discretizado i , con longitud l , diámetro D y sección A presenta una fuerza axial actuando en la base ($Q_{b,M}$) del elemento, otra a la mitad equivalente a la fuerza cortante lateral ($Q_{s,M}$) y una más en la cabeza del elemento ($Q_{t,M}$), y sus respectivos desplazamientos axiales $z_{b,M}$, $z_{s,M}$ y $z_{t,M}$ como se muestra en la Figura 2.7.

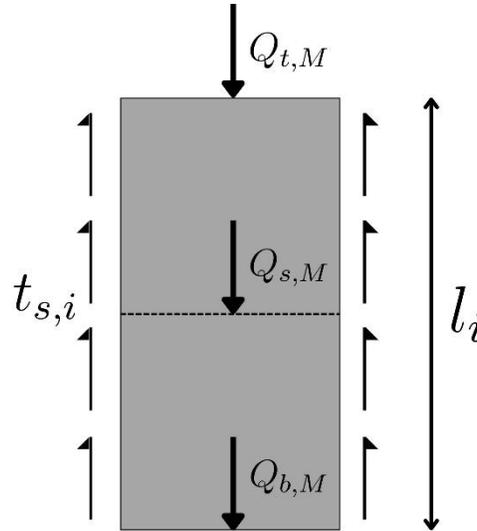


Figura 2.7 Elemento discretizado i del modelo de transferencia de cargas mecánico. $t_{s,i}$ es la fricción movilizada en el fuste (adaptado de Knellwolf *et al.*, 2011; Amatya *et al.*, 2012)

El proceso iterativo inicia en el elemento n proponiendo un desplazamiento z_b en la base de la pila y se debe suponer un desplazamiento $z_{b,M}$ en la base del elemento a partir de las curvas de transferencia de carga t_{b-z} . Con este valor, se obtiene la fuerza $Q_{b,M}$ y considerando $Q_{t,M} = 0$ se calcula la fuerza axial media del segmento como:

$$Q_{ave} = (Q_{b,M} + Q_{t,M})/2 \quad (2.13)$$

La compresión elástica ΔM se obtiene como:

$$\Delta M = Q_{ave}/K_i \quad (2.14)$$

donde K_i es la rigidez del elemento i . Así, el desplazamiento a la mitad del elemento se obtiene sumando la compresión elástica con el desplazamiento propuesta en la base del elemento i :

$$z_{s,M} = z_{b,M} + \frac{1}{2} \Delta M \quad (2.15)$$

Con el valor del desplazamiento a la mitad del elemento, se determina la fuerza a la mitad de este ($Q_{s,M}$) con ayuda de la curva t_{s-z} y se resuelve el elemento de la base. Después, se define una nueva fuerza axial en la cabeza del elemento:

$$Q_{t,M,nueva} = Q_{b,M} + Q_{s,M} \quad (2.16)$$

Si la diferencia entre la nueva fuerza axial y la carga propuesta anteriormente para la cabeza del elemento no es menor a la tolerancia definida por el usuario (un valor de 10^{-10} usado por Chen y McCartney, 2017) se calcula la fuerza media (ecuación 2.13) sustituyendo la nueva fuerza axial obtenida $Q_{t,M,nueva}$ y se repite el proceso hasta que la diferencia sea menor a la tolerancia definida. Cuando esto ocurra, se obtiene el desplazamiento en la cabeza del elemento como:

$$z_{t,M} = z_{b,M} + \Delta M \quad (2.17)$$

Cuando lo anterior se determine, el desplazamiento en la cabeza del segmento analizado será usado como el desplazamiento en la base del siguiente elemento a analizar (que se encuentra sobre el elemento analizado). Y el procedimiento se repite hasta alcanzar el elemento en la cabeza de la pila. Una vez resuelto este elemento, se utiliza una función secante (k_{sec}) del método de Newton igual a la fuerza que actúa en la cabeza de la pila sobre el desplazamiento en la base de esta para calcular el nuevo desplazamiento en la base:

$$k_{sec} = \frac{Q_{t,M}}{z_{b,M}} \quad (2.18)$$

$$z_{b,M,nuevo} = z_{b,M} + k_{sec}(P - Q_{t,M}) \quad (2.19)$$

donde P es la carga mecánica del peso de la superestructura y $Q_{t,M}$ es la fuerza en la cabeza obtenida por equilibrio. Con este nuevo valor, se realizan iteraciones para encontrar la nueva fuerza en la cabeza de la pila hasta que la diferencia entre esta y la carga real sea menor a la tolerancia establecida.

Cuando la pila se encuentra sometida a una carga térmica (subíndice T) se presentan desplazamientos y esfuerzos térmicos adicionales producto de la expansión y contracción que sufre la pila según el modo de operación. Para determinar estos esfuerzos y desplazamientos es conveniente determinar primero la ubicación del eje nulo (EN) que se encuentra localizado donde no hay expansión o contracción térmica, suponiendo que los cambios de temperatura se distribuyen uniformemente a lo largo de la pila. Así, la suma de

la fricción movilizada en la parte superior (a partir del EN) más la reacción de la superestructura es igual a la suma de la fricción movilizada en la parte inferior (a partir del EN) más la reacción en la base, esto es:

$$\sum_{i=1}^{EN} Q_{s,T} + Q_{t,T} = \sum_{i=EN+1}^n Q_{s,T} + Q_{b,T} \quad (2.20)$$

Para iniciar con el cálculo, se supone a la pila es totalmente libre de moverse y se propone la profundidad a la que se encuentra el eje nulo (EN). Como por definición no existen esfuerzos ni deformaciones en el eje nulo, el primer elemento por debajo de este eje (definido como $EN+1$) presenta un comportamiento definido por:

$$z_{t,T}^{EN+1} = 0 \quad (2.21)$$

$$z_{s,T}^{EN+1} = -\Delta_T^{EN+1} / 2 \quad (2.22)$$

$$z_{b,T}^{EN+1} = -\Delta_T^{EN+1} \quad (2.23)$$

donde Δ_T es la elongación térmica definida como el producto de la longitud del segmento de análisis (l_i), el coeficiente de contracción térmica (α) y el cambio de temperatura representativo seleccionado (ΔT):

$$\Delta_T = -l_i \alpha \Delta T \quad (2.24)$$

Mientras que los desplazamientos de los elementos por debajo del eje nulo tienen el siguiente comportamiento:

$$z_{t,T}^i = z_{b,T}^{i-1} \quad (2.25)$$

$$z_{s,T}^i = z_{t,T}^i - \frac{\Delta_T^i}{2} \quad (2.26)$$

$$z_{b,T}^i = z_{t,T}^i - \Delta_T^i \quad (2.27)$$

Cuando se llega al elemento en la punta, se obtiene el desplazamiento $z_{b,T}$ y se calcula la fuerza en la base $Q_{b,T}$ y la fuerza cortante $Q_{s,T}$ a partir de las curvas de transferencia de cargas

correspondientes. Con base en los valores de estas cargas, se definen las cargas que actúan en cada elemento hasta llegar al eje nulo. La carga axial en la cabeza de la pila y el esfuerzo térmico se determinan como:

$$Q_{t,T} = Q_{b,T} + Q_{s,T} \quad (2.28)$$

$$\sigma_T = \frac{Q_{t,T} + Q_{b,T}}{2A_b} \quad (2.29)$$

Se calcula una nueva elongación térmica que es usada como nuevo valor para iterar el comportamiento de cada elemento hasta que los valores converjan:

$$\Delta_{T,nueva} = \Delta_T - \frac{\sigma_T * l_i}{E} \quad (2.30)$$

Para determinar el comportamiento de los elementos por encima del eje nulo ($EN-1$), se tienen las siguientes expresiones:

$$z_{b,T} \begin{cases} 0 & \text{para } i = N_1 \\ z_{t,T}^{i+1} & \text{para } i \neq EN - 1 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$z_{s,T} = z_{t,T} + \frac{\Delta_T}{2} \quad (2.32)$$

$$z_{t,T} = z_{t,T} + \Delta_T \quad (2.33)$$

Cuando se llega a al elemento superior en la cabeza de la pila ($i=1$), se determina la fuerza cortante $Q_{s,T}$ a partir de la curva t_{s-z} y las cargas actuantes en cada segmento de la siguiente manera:

$$Q_{t,T} \begin{cases} K_h * z_{t,T} & \text{para } i = 1 \\ Q_{b,T}^{i-1} & \text{para } i \neq 1 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$Q_{b,T} = Q_{t,T} - Q_{s,M} \quad (2.35)$$

Se verifica que la diferencia de la nueva elongación térmica y la elongación térmica inicial para los segmentos por encima del eje nulo sea menor a la tolerancia definida.

Finalmente, para que se acoplen los resultados por la carga mecánica y por la térmica (termo-mecánica, subíndice TM) para obtener la respuesta general de la pila. Primero, para los elementos por debajo del EN , los desplazamientos se calculan a partir del elemento inmediato ($N_1 + 1$) hasta el último elemento ubicado en la base de la pila (N) con las siguientes expresiones:

$$z_{t,TM} \begin{cases} z_{t,M} & \text{para } i = N_1 + 1 \\ z_{t,TM} + z_{t,T} & \text{para } i \neq N_1 + 1 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$z_{s,TM} = z_{s,M} + z_{s,T} \quad (2.37)$$

$$z_{b,TM} = z_{b,M} + z_{b,T} \quad (2.38)$$

Después, se calculan las fuerzas axiales comenzando desde el elemento en la base (N) hasta el elemento inmediato por debajo del EN ($N_1 + 1$):

$$Q_{b,TM} \begin{cases} t b_T * A_b & \text{para } i = N \\ Q_{b,TM}^{i+1} & \text{para } i \neq N \end{cases} \quad (2.39)$$

$$Q_{s,TM} = t s_T * A_s \quad (2.40)$$

$$Q_{t,TM} = Q_{s,TM} + Q_{b,TM} \quad (2.41)$$

La resistencia unitaria (t) del fuste y la base se obtienen con su respectiva curva de transferencia de cargas, y la carga axial en la base se obtiene multiplicando la resistencia unitaria en la base (t_b) por su respectiva área (A_b), mientras que la fuerza cortante ocupa la resistencia unitaria en el fuste (t_s) por el área lateral del elemento de análisis (A_s).

Posteriormente, se calcula el esfuerzo y la nueva elongación térmica como sigue:

$$\sigma_{TM} = \frac{Q_{aveTM}}{A_b} = \frac{Q_{t,TM} + Q_{b,TM}}{2A_b} \quad (2.42)$$

$$\Delta_{T,nueva} = \Delta_T - \frac{\sigma_{TM} * l_i}{E} \quad (2.43)$$

Esta nueva elongación térmica se sustituye en las ecuaciones 2.22 y 2.26 para obtener nuevos desplazamientos térmicos hasta que la sección por debajo del EN converja. Por otra parte, los

desplazamientos por encima del *EN* comienzan a partir del elemento *NI* hasta llegar al segmento en la cabeza de la pila y se calculan como:

$$z_{b,TM} \begin{cases} z_{b,M} & \text{para } i = N_1 \\ z_{b,M} + z_{b,T} & \text{para } i \neq N_1 \end{cases} \quad (2.44)$$

$$z_{s,TM} = z_{s,M} + z_{s,T} \quad (2.45)$$

$$z_{t,TM} = z_{t,M} + z_{t,T} \quad (2.46)$$

Cuando se llega a hasta la cabeza de la pila, se procede con el cálculo de las fuerzas axiales empezando desde esta zona hasta el eje nulo y se determinan los esfuerzos termo-mecánicos como sigue:

$$Q_{t,TM} \begin{cases} P - K_h * z_{t,T} & \text{para } i = 1 \\ Q_{b,TM}^{i-1} & \text{para } i \neq N \end{cases} \quad (2.47)$$

$$Q_{b,TM} = Q_{t,TM} - Q_{s,TM} \quad (2.48)$$

$$\sigma_{TM} = \frac{Q_{aveTM}}{A_b} = \frac{Q_{t,TM} + Q_{b,TM}}{2A_b} \quad (2.49)$$

Para considerar la rigidez que existe en la cabeza y en la base de la pila impuesta por la superestructura y el suelo, respectivamente, se calcula una nueva elongación con una constante adicional (*m*) que reduce las variaciones entre el valor anterior de la elongación y el nuevo para lograr la convergencia en menos iteraciones:

$$\Delta_{T,nueva} = \Delta_T - m * \frac{\sigma_{TM} * l_i}{E} \quad (2.50)$$

Una vez que todos los elementos de la pila convergen, se calcula la fuerza no balanceada (F_{unb}) para determinar si la propuesta inicial del *EN* es correcta o debe modificarse. El proceso se itera hasta que F_{unb} sea menor que la tolerancia definida y el comportamiento termo-mecánico esté resuelto.

$$F_{unb} = |Q_{t,TM}^{EN+1}| + |Q_{b,TM}^{EN}| \quad (2.51)$$

- I. Si la $F_{unb} < 0$, el *EN* real se ubica por debajo del *EN* propuesto.
- II. Si la $F_{unb} > 0$, el *EN* real se ubica por encima del *EN* propuesto.

3 EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA REPRESENTATIVOS EN PILAS DE ENERGÍA

La evaluación de las metodologías analíticas para determinar el cambio de temperatura representativo en pilas de energía se realizó mediante un análisis comparativo entre los datos obtenidos del cambio de temperatura en distintos Ensayos de Respuesta Térmica (Brettmann y Amis, 2011; Singh *et al.*, 2015), pruebas de carga a escala real en pilas de energía (Feng *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2020) y los resultados generados con un código en lenguaje Matlab® basado en la metodología propuesta por Song *et al.* (2022). Este análisis comparativo tiene como objetivo evaluar la precisión de los resultados del código, estudiando la influencia de los diferentes factores e hipótesis utilizados, según la metodología descrita en el apartado 2.2. A continuación, se detallan los factores estudiados:

- I. **Tiempo:** Se evalúa la coherencia de las estimaciones del código a lo largo del tiempo (corto, mediano y largo plazo).
- II. **Carga térmica:** Se evalúa la efectividad del principio de superposición implementado para estimar el cambio de temperatura bajo diferentes tipos de cargas (constantes o variables).
- III. **Configuración del circuito primario:** Se evalúa la influencia de distintas configuraciones y cantidad de tubos en las estimaciones del cambio de temperatura que proporciona el código.

- IV. **Diámetro de pila:** Se evalúa la influencia de diferentes diámetros de pila en las estimaciones del cambio de temperatura que proporciona el código.
- V. **Criterio de resistencia térmica del concreto:** Se evalúa la versatilidad del criterio para simular diversas configuraciones del circuito primario y diámetros de pila de manera adecuada.
- VI. **Cambio de temperatura de diseño:** Se evalúa la precisión de las estimaciones del cambio de temperatura para determinar si los resultados describen la respuesta térmica general de la pila y si son adecuados para regir el diseño termo-mecánico.
- VII. **Estratigrafía del suelo:** Se evalúa la precisión y aplicabilidad del tradicional modelo de FLSM (*Finite Line Source Model*, por sus siglas en inglés) comparando los resultados del código y los obtenidos en campo en un suelo con diferentes propiedades térmicas.

Todos estos factores son analizados en cada caso que se presenta a continuación. Además, gracias a las condiciones de diseño y prueba de las pilas, en algunos fue posible realizar un análisis más detallado de factores específicos resaltando su influencia. La Tabla 3.1 muestra los factores que destacan en cada caso.

Tabla 3.1 Factores analizados para la evaluación del método para la obtención de los cambios de temperatura representativos en pilas de energía implementado con el código *RTEMP*

Factores	Casos			
	Wu <i>et al.</i> (2020)	Brettman y Anis (2011)	Murphy <i>et al.</i> (2014)	Singh <i>et al.</i> (2015)
Tiempo		x		x
Carga térmica	x	x	x	x
Configuración del circuito primario	x			x
Criterio de resistencia térmica del concreto	x			x
Diámetro de pila		x		
Cambio de temperatura de diseño	x		x	x
Estratigrafía del suelo			x	x

En los siguientes apartados se describen las condiciones del sitio de prueba, las características de las pilas de energía utilizadas, el esquema de prueba (carga térmica y tiempo de prueba), la instrumentación implementada y los parámetros utilizados para la obtención de la respuesta térmica de las pilas de energía con el código *RTEMP*. Luego, se presentan los resultados obtenidos con el código *RTEMP* y los reportados en cada caso. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos mediante un análisis comparativo entre los resultados *in-situ* y los obtenidos con *RTEMP*.

3.1 Caso 1. Pila de energía con tubería en espiral

Wu *et al.* (2020) realizaron un estudio para investigar el comportamiento termo-mecánico de pilas de energía equipadas con tuberías con una configuración en espiral, analizaron una a escala real con estas características y dos modelaciones numéricas hechas en COMSOL Multiphysics, una con configuración de tubería del circuito primario en U conectada en serie (U-Serie) y otra en U conectada en paralelo (U-Paralelo).

El sitio donde se realizó la prueba de campo se llevó a cabo en la ciudad de Jiangyn, China, donde se encontró un suelo predominantemente cohesivo y con buena rigidez, y nivel freático a 0.5 m por debajo de la superficie. Las propiedades físicas y térmicas del suelo se determinaron mediante pruebas de laboratorio hechas en muestras obtenidas *in situ*. La Tabla 3.2 reúne las propiedades térmicas necesarias para obtener los cambios de temperatura representativos en la pila de energía.

Tabla 3.2 Propiedades térmicas del suelo (adaptado de Wu *et al.*, 2020)

Material	Tipo de suelo	Profundidad (m)	ρ (kg m ⁻³)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Suelo					
Estrato 1	Arcilla limosa	0 - 6.2	1880	1.66	2900
Estrato 2	Arcilla con grava	6.2 - 10.3	2030	1.76	2600
Estrato 3	Arcilla limosa	10.3 - 19.1	2020	1.85	2500
Estrato 4	Arcilla arenosa	Debajo de 19.1	2070	1.85	2500
Concreto	-	-	2500	1.9	1000
Tubería	-	-	-	0.46	-

Nota: ρ es la densidad (kg m⁻³), λ es la conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹) y C_p capacidad calorífica específica (J kg⁻¹ K⁻¹)

La pila de energía construida es de concreto reforzado, tiene una longitud de 20 m y un diámetro de 1 m, fue equipada con una tubería de intercambio de calor de polietileno en espiral de 190 m de longitud y un diámetro nominal de 23 mm (Figura 3.1a y Figura 3.1b). Los modelos 3-D en COMSOL Multiphysics de las pilas con tubería en U tienen la misma geometría que la pila en campo y, aunque la configuración de la tubería no es la misma, también mantienen la misma longitud total de la tubería; la configuración en U-Serie se considera como un solo tubo de longitud igual a 190 m (Figura 3.1c), mientras que la U-paralela consiste en cinco bucles que en conjunto logran una longitud de 190 m (Figura 3.1d).

El esquema de prueba consistió en un ciclo de calentamiento con la aplicación de una carga constante de 4.8 kW a lo largo de 240 horas. La instrumentación utilizada para monitorear la variación de la temperatura en la pila incluía 10 termistores acompañados con deformímetros de cuerda vibrante a cada 2 m a lo largo de la pila sobre su eje longitudinal como se ilustra en la Figura 3.1a.

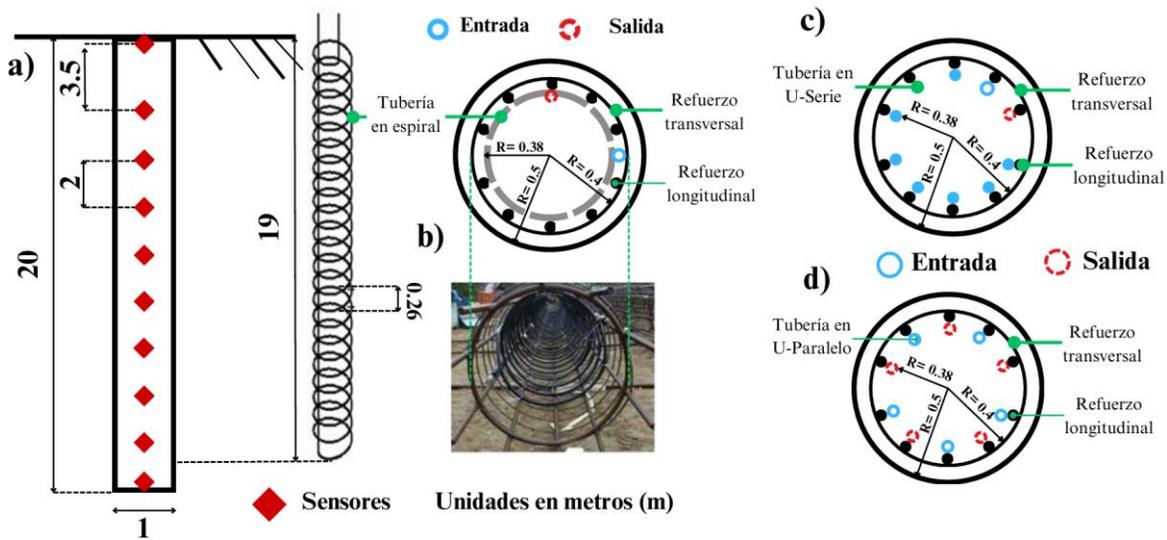


Figura 3.1 a) Esquema longitudinal y b) corte transversal de la pila de energía hecha *in-situ*, c) corte transversal de pila en U-Serie y d) corte transversal de pila en U-Paralelo modeladas en COMSOL (adaptado de Wu *et al.*, 2020)

La Tabla 3.3 reúne los parámetros utilizados para obtener la respuesta térmica de la pila implementando el código. Es importante mencionar que, las propiedades del suelo (densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica) fueron determinadas como el promedio de las reportadas en las pruebas de laboratorio (Tabla 3.2) y que el número de tubos de intercambio de calor se consideró igual a 10 dado que cada bucle consiste en un par de tubos (uno de entrada y otro de salida). Debido a que el método implementado con el código considera únicamente el número de tubos sin importar la configuración, se realizó una sola prueba para comprar sus resultados con las tres pilas analizadas por Wu *et al.* (2020).

Tabla 3.3 Parámetros utilizados en el código *RTEMP* para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de pila de energía con tubería en espiral

Parámetro	λ ($W m^{-1} K^{-1}$)	C_p ($J kg^{-1} K^{-1}$)	C_v ($J m^{-3} K^{-1}$)	ρ ($kg m^{-3}$)	D_T ($m^2 s^{-1}$)	L (m)	D (m)	N (Cantidad)	d (mm)
Material	Suelo Pila	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Pila	Pila	Tubos	Tubos
Valor	1.78 1.9	2625	-	2000	3.39048E-07	20	1	10	23

Nota: λ es la conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), C_p capacidad calorífica específica ($J kg^{-1} K^{-1}$), C_v capacidad calorífica volumétrica ($J m^{-3} K^{-1}$), ρ la densidad ($kg m^{-3}$), D_T difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$), L longitud de la pila (m), D diámetro de la pila (m), N cantidad de tubos de intercambio de calor y d diámetro exterior de la tubería de intercambio de calor (mm).

CAPÍTULO 3

3.1.1 Análisis de resultados

En la Figura 3.2 se muestran los resultados del cambio de temperatura promedio en las pilas de energía simuladas en COMSOL Multiphysics y los valores obtenidos con el código *RTEMP*. Se aprecia que los resultados del código son coherentes y ligeramente menores respecto a los demás casos. En cambio, el caso de la pila con una configuración en U-Paralelo presenta los valores más altos. La pila con tubería en espiral (Espiral In-situ) y la pila con tubería en U-Serie exhiben un comportamiento similar y tienden hacia los valores obtenidos en el caso U-Paralelo.

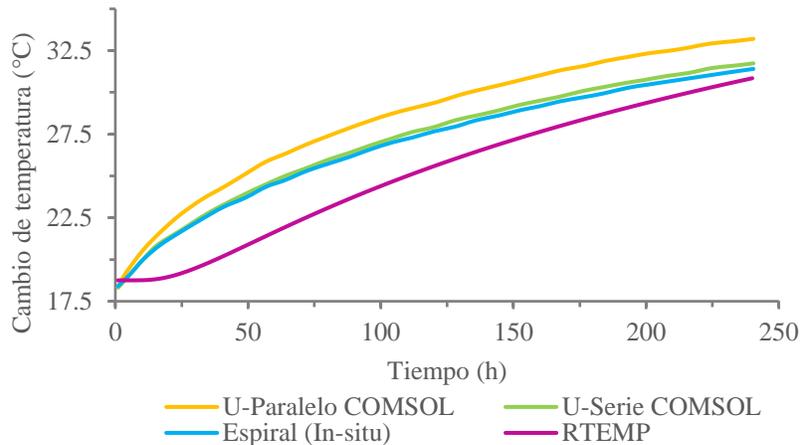


Figura 3.2 Cambio de temperatura en una pila de energía con diferente configuración del circuito primario modelada en COMSOL Multiphysics (adaptado de Wu *et al.*, 2020)

Los resultados de *RTEMP* en relación con las configuraciones U-paralelo, U-Serie y Espiral In-Situ muestran variaciones a lo largo del periodo de prueba medidas con el error relativo como se muestra en la Figura 3.3. Para los U-Paralelo se determinó un error relativo máximo del 17.41% (4.32°C) durante las primeras 45 horas, disminuyendo a un 7.02% (2.33°C) al final del análisis, manteniendo un Error Relativo Medio (ERM) del 12.19%, equivalente al 3.43°C en promedio. En el caso de los U-Serie el error relativo máximo fue del 13.27% (3.08°C) en las primeras 40 horas, reduciéndose al 2.76% (0.87°C) al término del análisis, con un ERM de 7.95% que corresponde a 2.1°C en promedio. Finalmente, para la configuración Espiral In-Situ se obtuvo un error relativo máximo del 12.68% (2.93°C) en las primeras 40 horas disminuyendo a 1.70% (0.43°C) al final del análisis, con un ERM de 7.10% que representa aproximadamente 1.84°C en promedio.

El máximo error obtenido con el código implementado en esta tesis es del 17.41% (4.32°C) respecto al caso donde se analiza una pila con tubería U-Paralelo, siendo esta configuración la que presenta mayor discrepancia respecto a los modelos con las mismas condiciones de diseño (térmicas y geotécnicas), pero diferente configuración de la tubería. Los autores indican que la transferencia de calor es menos eficiente en una configuración en paralelo

respecto a otras configuraciones debido a la corta longitud del bucle en U. En este caso, el fluido caloportador tiene menos tiempo para disipar calor, por lo que la temperatura de la pila puede establecerse aproximadamente en la temperatura del fluido caloportador (que son más altas comparadas con la pila en el momento de la entrada). No obstante, es importante señalar que, de acuerdo con el criterio para estimar la resistencia térmica del concreto (apartado 2.2.1), el cambio de temperatura que estima el código debería ser mayor y aproximarse más a la configuración en U-Paralelo, pero es menor y se acerca más a las pilas U-Serie y Espiral In-Situ. Lo anterior puede ser atribuido a que la influencia de la cantidad de tubos no es significativamente influyente en las estimaciones del código, como se determinó en el Anexo I. Este comportamiento demuestra que las estimaciones del código se acercan más a lo obtenido en campo que con lo establecido teóricamente por Song *et al.* (2022).

Para los demás casos (U-Serie y Espiral In-Situ), el análisis de error demuestra que el error relativo medio es bajo, menor al 15% (de hasta 3.08°C) (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b) lo que sugiere que el modelo analítico en *RTEMP* tiene un buen nivel de precisión en los casos evaluados.

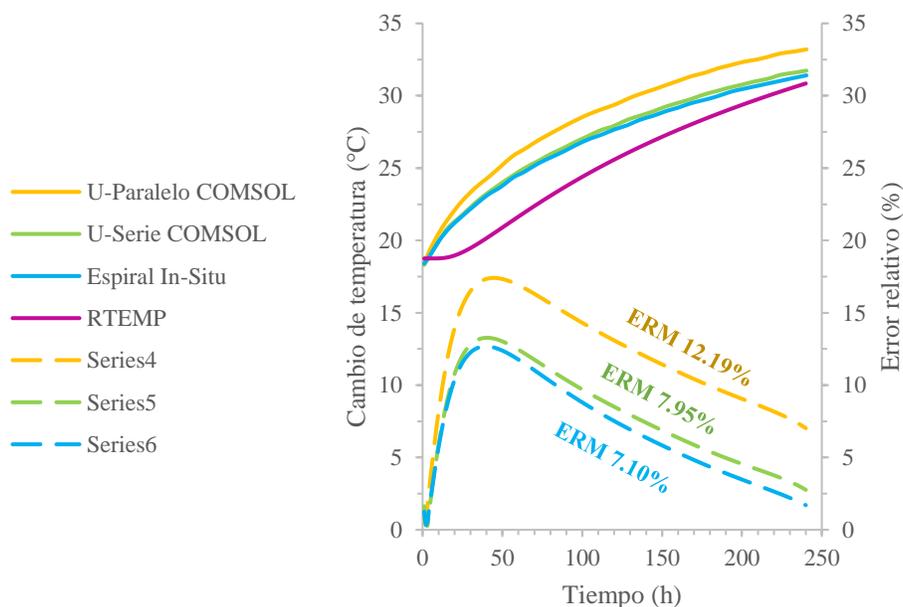


Figura 3.3 Cambio de temperatura y error relativo de los resultados con *RTEMP* y los modelos numéricos de diferentes pilas de energía. Las líneas punteadas coinciden con el eje vertical derecho y las líneas continuas con el eje vertical izquierdo

El modelo analítico ofrece estimaciones confiables al considerar diferentes configuraciones de tubería, ya que mantiene coherencia en el cálculo y muestra un patrón similar al de la simulación numérica. Desde el inicio, los resultados del código presentan una ligera diferencia de aproximadamente 0.23°C y conforme avanza el tiempo dicho valor disminuye

CAPÍTULO 3

(Figura 3.3). Además, al final del periodo de calentamiento (240 h) el error relativo llega al 7.02%, el valor más bajo desde el pico observado alrededor de las 40 horas de prueba. Esto comportamiento se explica con la hipótesis del flujo de calor establecido (o flujo estacionario) (Carslaw y Jaeger, 1959). Después de un tiempo, dadas las propiedades de los materiales, el cuerpo alcanza un punto de equilibrio térmico donde la temperatura se mantiene constante, lo cual coincide con los resultados obtenidos en este caso de análisis. Lo anterior demuestra que el modelo analítico implementado en el código *RTEMP* es capaz de representar la etapa de flujo estacionario, verificando que el principio de superposición y el criterio para estimar la resistencia térmica del concreto son adecuados para estimar los cambios de temperatura representativos de las pilas de energía.

Un aspecto importante que considerar es el sesgo en las estimaciones del cambio de temperatura obtenidas con el código, ya que, durante las primeras 45 horas de prueba, estas son menores respecto a los resultados numéricos. Este comportamiento contrasta con la respuesta instantánea característica de los modelos analíticos, los cuales suelen ofrecer estimaciones mayores en periodos cortos respecto a los modelos numéricos.

Por último, se concluye que la temperatura representativa obtenida mediante el modelo implementado en el código *RTEMP* (apartado 3.2) es la más adecuada para el diseño termomecánico de las pilas de energía, ya que sus estimaciones se aproximan más a la respuesta promedio en todo el volumen de la pila, como se muestra en la Figura 3.4. Lo anterior también permite sustentar la hipótesis de un medio homogéneo, considerada en el modelo *FLSM* (*Finite Line Source Model*), como una opción válida, a pesar de que la respuesta térmica de las pilas de energía varía con la profundidad de acuerdo con las propiedades térmicas de los estratos (Abdelaziz, 2013; Murphy *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020).

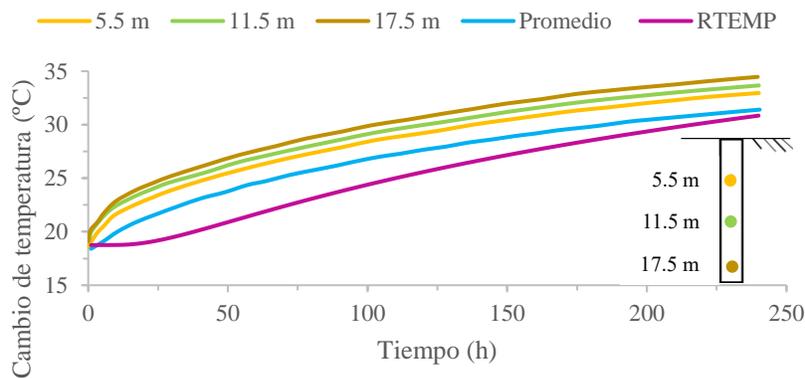


Figura 3.4 Cambio de temperatura promedio y a diferentes profundidades de la pila de energía in situ con tubería en espiral (adaptado de Wu *et al.*, 2020)

Vale la pena mencionar que se podrían obtener resultados aún más precisos si se implementa un modelo que considere la estratigrafía del suelo en la respuesta térmica de la interfaz suelo-

pila, que describe la ecuación 2.6, como el modelo propuesto por Abdelaziz (2013) y también si se consideran técnicas más adecuadas para considerar un medio homogéneo hipotético basado en uno estratificado real.

3.2 Caso 2. APGE Piles

Para demostrar que los estándares descritos en la ASHRAE 1118-TRP sobre pruebas en pozos intercambiadores de calor (BHE, *Borehole Heat Exchangers* por sus siglas en inglés) con diámetro pequeño eran aplicables a pilas de energía a pesar de contar con diámetros mayores (hasta 1 m) y ser de material compuesto (concreto y acero), Brettmann y Amis (2011) llevaron a cabo pruebas de conductividad térmica, individuales y en grupo, en pilotes de inyección convertidos en pilotes de energía o Auge Pressure Grouted Energy Piles (APGE Piles).

El sitio de prueba Berkel, propiedad de la empresa Berkel & Company Contractors, especializada en servicios de cimentación y construcción, se encuentra en Richmon, Texas. El suelo de este lugar presenta una estratigrafía compleja de arena, limo y arcilla, cuya densidad aumenta con la profundidad. Para determinar la densidad y la conductividad térmica de cada estrato, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio a partir de muestras obtenidas *in situ*. La estratigrafía y las propiedades térmicas obtenidas se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Propiedades del suelo del sitio de prueba (adaptado de Brettmann y Amis, 2011)

Material	Tipo de suelo	Profundidad (m)	ρ (kg m ⁻³)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Suelo					
Estrato 1	Arcilla	0 - 6.1	1730	2.22	2900
Estrato 2	Arena	6.1 - 13.7	1740	4.05	2600
Estrato 3	Arcilla	13.7 - 18.3	1540	2.09	2500

Nota: ρ es la densidad (kg m⁻³), λ es la conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹) y C_p capacidad calorífica específica (J kg⁻¹ K⁻¹).

En el sitio de prueba se instalaron dos pilas de 18.3 m de longitud, una con diámetro igual a 0.3 m (P1) y otra de 0.45 m (P2), equipadas con tubería de intercambio de calor de 25 mm de diámetro dispuesta en dos bucles paralelos en U y tres termistores embebidos al centro de la pila sobre el eje longitudinal a una profundidad de 6.1, 13.7 y 18.3 m. Asimismo, se instrumentó un pozo de sondeo para monitorear la temperatura del suelo.

El esquema de prueba se realizó bajo una carga de calor constante de 4.2 kW durante ocho días (192 h) aplicado al grupo de pilas y al pozo simultáneamente. De los resultados de la prueba de conductividad térmica, se definió (Brettmann y Amis, 2011) la conductividad térmica de las pilas P1 y P2 como 2.58 y 2.56 W · m⁻¹ · K⁻¹ respectivamente. A la capacidad calorífica específica y a la densidad del suelo se les asignaron los valores de 1141

$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (Abdelaziz, 2013) y $1670 kg \cdot m^{-3}$, respectivamente. La Tabla 3.5 reúne los parámetros necesarios para la prueba utilizando el código *RTEMP*.

Tabla 3.5 Parámetros utilizados en el código *RTEMP* para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de APGE Piles

Parámetro	λ		C_p		C_v		ρ		D_T		L		D		N		d	
	$(W m^{-1} K^{-1})$		$(J kg^{-1} K^{-1})$		$(J m^{-3} K^{-1})$		$(kg m^{-3})$		$(m^2 s^{-1})$		(m)		(m)		$(Cantidad)$		(mm)	
Material	Suelo	Pila	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Pila	Pila	Pila	Pila	Tubos	Tubos	Tubos	Tubos	Tubos
Valor	2.79	2.58 2.56	1141	-	1670	1.46421E- 06	18.3	0.3 0.45	4	25								

Nota: λ es la conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), C_p capacidad calorífica específica ($J kg^{-1} K^{-1}$), C_v capacidad calorífica volumétrica ($J m^{-3} K^{-1}$), ρ la densidad ($kg m^{-3}$), D_T difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$), L longitud de la pila (m), D diámetro de la pila (m), N cantidad de tubos de intercambio de calor y d diámetro exterior de la tubería de intercambio de calor (mm).

3.2.1 Análisis de resultados

La Figura 3.5 muestra las mediciones obtenidas por los termistores al centro de cada pila y las obtenidas con el código *RTEMP* (líneas continuas), así como el error relativo del código respecto a las mediciones en campo (líneas punteadas). Hay que mencionar que Brettmann y Amis (2011) no especifican si las mediciones reportadas son el promedio de los tres termistores a lo largo de la pila o se obtuvieron a una profundidad determinada, por lo que se considera como el promedio, ya que no reportan alguna otra medición adicional. De acuerdo con los autores, la distancia aproximada entre el centro de la tubería de intercambio de calor y los termistores al centro de la pila es menor que 0.07 m en las dos pilas de prueba, por lo que desde este punto puede considerarse que la temperatura medida es más representativa del fluido caloportador que de la pila misma. No obstante, se aprecia que el código exhibe un comportamiento similar a las mediciones de campo, alcanzando al final de la prueba las temperaturas medidas (fenómeno observado en el Caso 3.1, atribuido a las condiciones estacionarias del flujo de calor).

Por otra parte, se aprecia que el código estima correctamente los efectos de un cambio de diámetro en la pila de acuerdo con lo presentado en el apartado 2.2.1, donde para diámetros mayores el cambio de temperatura disminuye, y para diámetros menores el cambio de temperatura incrementa. Aunque en las mediciones de campo ocurre lo contrario, no hay que perder de vista que los termistores están ubicados a la misma distancia a partir del centro de cada pila, por lo que el comportamiento contrario que se presenta puede deberse a diversos factores como la calibración del equipo de medición, variación en la temperatura de entrada del fluido o por variación de las propiedades térmicas de los materiales, o incluso por interferencias térmicas.

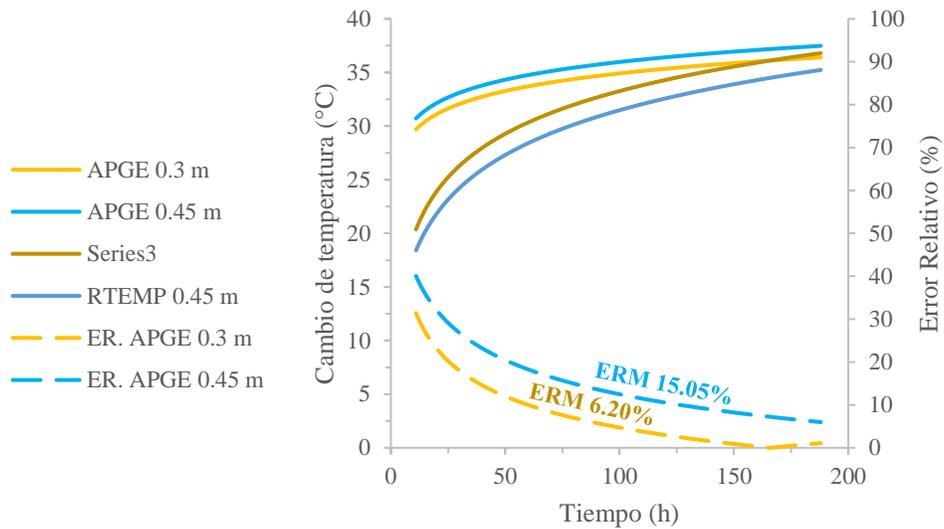


Figura 3.5 Cambios de temperatura y error relativo de diferentes pilas de energía (adaptado de Brettmann y Amis, 2011)

La diferencia entre los resultados del código y las mediciones durante las primeras horas de análisis puede justificarse debido a la proximidad entre los termistores y los bucles en “U”. Al estar cerca, la temperatura que registran es similar a la del fluido caloportador. Si estuvieran más alejados, reflejarían una respuesta menor debido a la disipación de calor en el material de la pila, lo que sí considera el modelo implementado en el código. Esta suposición se respalda con las ecuaciones de tendencia presentadas por Brettmann y Amis (2011), las cuales indican como ordenada en el momento cero (inicio de prueba) una temperatura de aproximadamente 24.5°C para las dos pilas, que coincide con la temperatura de entrada del fluido (24°C) (Brettmann y Amis, 2011). Estos resultados se corroboraron utilizando el código para estimar el cambio de temperatura en la interfaz tubo-pila, donde se obtuvo una temperatura inicial de 25.37°C (Figura 3.6), 0.87°C más alta que la registrada por los termistores.

Con base en estos resultados, se concluye que el principio de superposición, el criterio para estimar la resistencia térmica del concreto implementados con el código y el método en general son adecuados para obtener el cambio de temperatura representativo en las pilas de energía al analizar elementos con diferentes diámetros. Se determinaron errores relativos medios (aceptables) del 6.20% (2.05°C) y 15.05% (5.21°C) para las pilas de 0.3 y 0.45 m de diámetro, respectivamente. Además, se observó que estos valores disminuyen con el transcurso del tiempo.

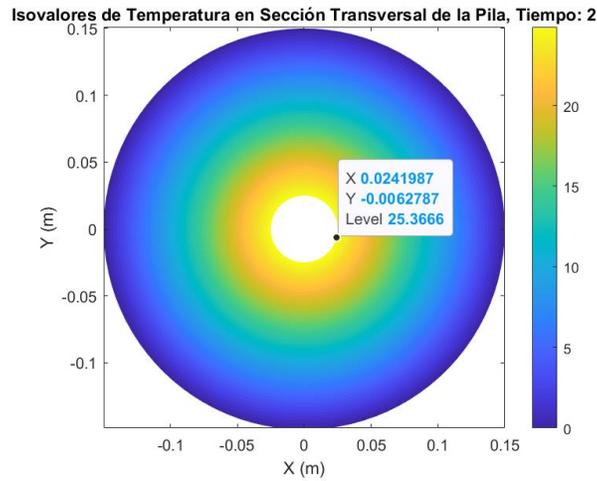


Figura 3.6 Distribución de la temperatura en sección transversal de una pila de energía a la profundidad de 0.3 m al inicio del ciclo de calentamiento

3.3 Caso 3. US Air Force Academy

Como parte del desarrollo de estructuras de energía neta nula (Net-zero energy), se construyeron ocho pilas de energía a escala real como parte de la cimentación de un nuevo edificio en la Academia de la Fuerza Aérea Estadounidense (US Air Force Academy, USAFA), en Colorado, EE. UU. Para demostrar los beneficios de estas estructuras al Departamento de Defensa de los Estados Unidos (United States Department of Defense, DoD), Murphy *et al.* (2015) llevaron a cabo un estudio sobre el comportamiento termomecánico y evaluaron el desempeño energético en tres de las ocho pilas construidas.

Para obtener obtener muestras del suelo en el sitio de estudio, se llevó a cabo una exploración de campo a 12 y 7 m de profundidad. Se obtuvieron las propiedades mecánicas a partir de pruebas de laboratorio y las propiedades térmicas se determinaron mediante la prueba de aguja térmica. La Tabla 3.6 presenta la estratigrafía encontrada durante la exploración geotécnica en la USAFA y su respectiva conductividad térmica.

Tabla 3.6 Propiedades del suelo en el sitio de prueba (adaptado de Murphy *et al.*, 2015)

Material	Tipo de suelo	Profundidad (m)	ρ (kg m ⁻³)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Suelo					
Estrato 1	Arena con limo y grava	0 - 1	1876.3	1.118	2900
Estrato 2	Arena densa con limo y grava	1 - 2	1957.86	0.785	2600
Estrato 3	Lecho rocoso	2 - hasta la longitud de pila	-	1.233	2500

Nota: ρ es la densidad (kg m⁻³), λ es la conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹) y C_p capacidad calorífica específica (J kg⁻¹ K⁻¹)

Las ocho pilas de energía construidas en la USAFA son de 15.2 m de longitud con un diámetro de 0.61 m, equipadas con tubería para el intercambio de calor de polietileno de alta densidad de 19 mm. La configuración de la tubería es diferente en cada pila para estudiar su comportamiento durante la operación del sistema y su eficiencia energética. Las primeras cuatro pilas contienen la misma configuración que consta de dos bucles en serie tipo U (U-Serie).

La instrumentación se colocó en la pila 1, 3 y 4 para monitorear la distribución de las deformaciones axiales y la temperatura a lo largo de su profundidad. La pila 4 fue la más equipada, contando con 12 deformímetros de cuerda vibrante Geokon modelo 4200 (VWSG) y 12 termistores fijados a soportes soldados en las barras de refuerzo longitudinales a profundidades de 0.8, 2.6, 4.4, 5.9 7.6, 9.1, 10.9, 12.8 y 14.6 m. Las pilas 1 y 3 incluyeron la mitad de estos sensores. Para monitorear la temperatura alrededor de las pilas 3 y 4 se construyeron ocho pozos de sondeo rellenos con concreto de alta conductividad térmica, equipados con seis termistores Geokon modelo 3810 distribuidos a lo largo de la misma profundidad de las pilas. La etapa de carga térmica consistió en aplicar un flujo de calor nominal de 11kW distribuido entre las cuatro primeras pilas durante 480 h. La pila 4 fue sometida a una carga térmica de 97.9 W m^{-1} , la 3 a 109.4 W m^{-1} y la pila 1 a 105.2 W m^{-1} .

El código *RTEMP* fue utilizado para obtener la respuesta térmica de la pila 4, ya que las mediciones obtenidas de esta pila son más completas debido a su instrumentación. Se consideró una conductividad térmica de $1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, que es un valor típico en estos elementos (Abdelaziz, 2013). Para el suelo la capacidad calorífica se asignó como $1632 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ y la densidad con un valor de $2010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Abdelaziz, 2013). La conductividad térmica fue el promedio de los valores reportados en la exploración del suelo, de acuerdo con la Tabla 3.6. La Tabla 3.7 resume los parámetros empleados para determinar la respuesta térmica de la pila utilizando el código desarrollado.

Tabla 3.7 Parámetros utilizados en el código *RTEMP* para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso US Academy Air Force

Parámetro	λ		C_p		C_v	ρ	D_T	L	D	N	d
	$(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$		$(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$		$(\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1})$	(kg m^{-3})	$(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$	(m)	(m)	(Cantidad)	(mm)
Material	Suelo	Pila	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Pila	Pila	Tubos	Tubos
Valor	1.045	1.4	1632	-	2010	$3.18566\text{E}-07$	15.2	0.61	4	19	

Nota: λ es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), C_p capacidad calorífica específica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), C_v capacidad calorífica volumétrica ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$), ρ la densidad (kg m^{-3}), D_T difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), L longitud de la pila (m), D diámetro de la pila (m), N cantidad de tubos de intercambio de calor y d diámetro exterior de la tubería de intercambio de calor (mm).

3.3.1 Análisis de resultados

En este apartado se presentan los resultados del cambio de temperatura medido en la pila cuatro a tres profundidades, 0.8, 7.6 y 14.7 m, y un promedio del cambio de temperatura obtenido de los nueve termistores instalados en la pila. Además, se incluye el perfil de temperatura obtenido mediante el uso del código *RTEMP*. La instrumentación implementada en esta pila permitió recopilar un mayor número de datos, lo que proporcionó un promedio más representativo del cambio de temperatura a lo largo de su profundidad (análogamente opuesto al caso anterior 3.2.1). Los autores señalan que se colocaron sensores en puntos opuestos de la pila para garantizar redundancia en las mediciones de temperatura y las deformaciones. De acuerdo con la Figura 3.7, los registros a las profundidades de 7.6, 14.6 y 0.8 m corresponden al valor máximo, mínimo y medio, respectivamente, que conforman una envolvente que permite visualizar con mayor detalle la distribución de los resultados obtenidos con el código respecto a los datos medidos en campo.

En general, los resultados obtenidos con el código *RTEMP* presentan un sesgo durante la primera mitad del periodo de análisis (249 h), similar a lo que sucede en los casos anteriores (3.1 y 3.2). A partir de este punto, los resultados alcanzan la envolvente entre el valor máximo y mínimo registrado por todos los sensores, con valores cercanos al valor medio registrado. Las variaciones de temperatura a lo largo de la pila registradas en campo se deben a las propiedades térmicas del suelo, sin embargo, mantienen una tendencia relativamente uniforme (Murphy *et al.*, 2015), que sustenta el marco comparativo para evaluar los resultados obtenidos con el código.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados con *RTEMP* y el promedio de los registros de campo en la pila 4 (representados por la línea negra en la Figura 3.7). Se observa que el promedio se mantiene dentro del rango delimitado por los valores mínimo y máximo registrados a lo largo del tiempo, mostrando un comportamiento similar al estimado con el código. Durante la primera mitad del ciclo de calentamiento se detectó una diferencia notable de temperatura. No obstante, esta diferencia disminuye con el tiempo, lo que permite que las estimaciones de *RTEMP* se aproximen progresivamente al promedio de los registros de campo, con un error relativo medio de 6.56% (1.44°C) y un error relativo máximo del 21.59% (3.86°C). Al finalizar la prueba, el código y el promedio de las mediciones mostraron una diferencia de apenas 3.06% (0.89°C). Estos resultados indican que la metodología evaluada es consistente (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b) y es capaz de reproducir de manera adecuada la respuesta térmica de la pila de energía. Por otra parte, el código tiene un sesgo durante las primeras horas de prueba, aunque presenta un buen ajuste con una diferencia de apenas 1.36°C (14.32%). El sesgo que se menciona puede deberse a la transferencia de calor *in situ*, dado que al estar los sensores cerca de las tuberías, o incluso en una distancia media entre la pila y la tubería, la temperatura medida es ligeramente más alta. No obstante, al final de la prueba los valores se estabilizan y el código se ajusta mejor.

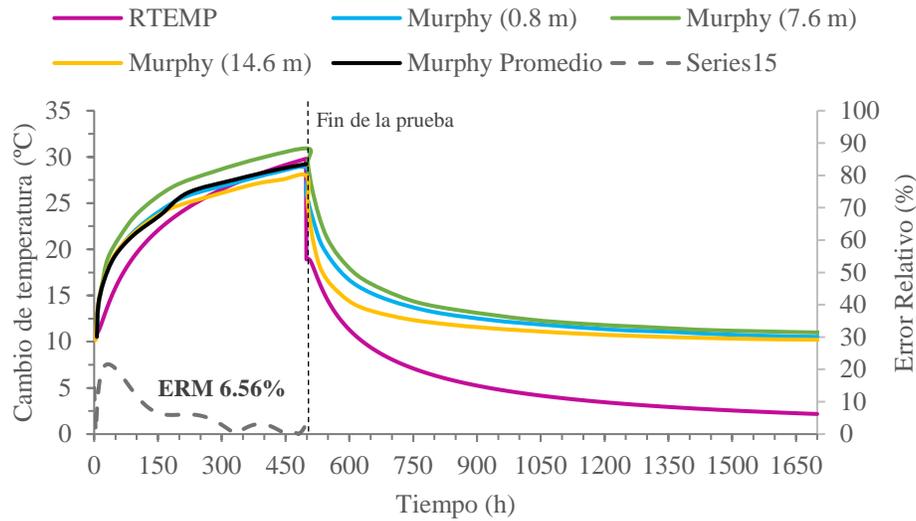


Figura 3.7 Error relativo y respuesta térmica promedio, representativa y a diferentes profundidades de la pila (adaptado de Murphy *et al.*, 2015)

Después del periodo de calentamiento (la línea punteada en la Figura 3.7) sigue la etapa de enfriamiento natural hasta que la pila regresa a su temperatura original, algo que el código no es capaz de reflejar simulando una suspensión de la carga térmica ($q=0 W/m$) a partir del final de la prueba (498 h). Esto se debe a que los modelos analíticos no consideran el fenómeno transitorio del flujo de calor y las propiedades térmicas de los materiales, por lo que su respuesta es prácticamente inmediata. Por esta razón se observa que al código le toma muy poco tiempo (110 h) regresar a la temperatura con la que inicia después del periodo de calentamiento.

Por último, es importante señalar que, al igual que en los casos anteriores (3.1 y 3.2) y a pese a las limitaciones del código en cuanto a la cantidad de tubos de intercambio de calor (Anexo I) y la hipótesis de un medio homogéneo, el modelo analítico implementado ofrece resultados que describen de manera coherente y consistente la temperatura en la pila. Cabe destacar que, según lo descrito en el apartado 3.2.1, un mayor número de tubos debería generar un aumento significativo en el cambio de temperatura, mientras que una menor cantidad de tubos produciría una variación más moderada. No obstante, los resultados obtenidos muestran un comportamiento diferente, lo cual coincide más con las observaciones registradas en campo (Murphy *et al.*, 2015) que con la establecido teóricamente por Song *et al.* (2022).

3.4 Caso 4. Respuesta térmica en una pila de energía instrumentada con celdas Osterberg

Singh *et al.* (2015) realizaron una prueba de calentamiento en una pila de energía instrumentada y equipada con dos celdas O (celdas Osterberg) para estudiar su

CAPÍTULO 3

comportamiento termo-mecánico y su respuesta térmica bajo un flujo de calor constante, así como su enfriamiento natural después de la prueba.

Durante la exploración geotécnica se perforó un pozo de sondeo de 18.6 m de profundidad para determinar la estratigrafía del sitio de prueba. Se llevaron a cabo pruebas de penetración estándar (SPT) a cada 1.5 m de profundidad y pruebas con penetrómetro de bolsillo con muestras obtenidas con tubos U63 para evaluar la resistencia del suelo *in-situ*. La Tabla 3.8 muestra las condiciones encontradas en el suelo.

Tabla 3.8 Propiedades del suelo en el sitio de prueba (adaptado de Singh *et al.*, 2015)

Material	Tipo de suelo	Profundidad (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	C_v (MJ m ⁻³ K ⁻¹)
Suelo				
Estrato 1	Material de relleno	0 - 1.5	-	-
Estrato 2	Arcilla arenosa	1.5 - 2.5	1.7	2.0 - 2.7
Estrato 3	Arena con trazas de arcilla	2.5 - 10	1.6	1.3 - 1.5
Estrato 4	Arena	10 - 16.1	2 - 2.2	1.2 - 1.4

Nota: λ es la conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹) y C_v capacidad calorífica volumétrica (MJ m⁻³ K⁻¹)

La pila de energía analizada consiste en un elemento de concreto armado con un diámetro de 0.6 m y una longitud de 16.1 m. Se equipó con tres bucles en U de polietileno de alta densidad de 25 mm de diámetro, que funcionaron individualmente (Figura 3.8a) y en serie (Figura 3.8c). La pila fue instrumentada con sensores de deformación y temperatura de cuerda vibrante (simultáneamente), transductores de desplazamiento y manómetros para monitorear el comportamiento de la pila durante la acción de las cargas térmicas y mecánicas. Estos se numeran de izquierda a derecha, de arriba debajo de acuerdo con la Figura 3.8a.

El esquema de prueba lo conforman tres casos en los que se evalúa la respuesta de la pila en diferentes condiciones de operación bajo la acción de una carga térmica de 155.27 W m⁻¹:

- I. Caso 1-Bucle CP. Funciona un solo bucle U (Figura 3.8b) durante un periodo de 3 días (corto plazo).
- II. Caso 3-Bucles CP. Funcionan tres bucles U en serie (Figura 3.8c) durante un periodo de 9 días (corto plazo).
- III. Caso 3-Bucles LP. Funcionan tres bucles U en serie (Figura 3.8c) durante un periodo de 52 días (largo plazo).

La conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica del suelo utilizadas en el código *RTEMP* fueron calculadas como el promedio entre los extremos reportados en la Tabla 3.8. La conductividad térmica de la pila se definió como 1.4 W · m⁻¹ · K⁻¹, que es un valor típico en estos elementos (Abdelaziz, 2013). La Tabla 3.9 reúne los parámetros utilizados en el código.

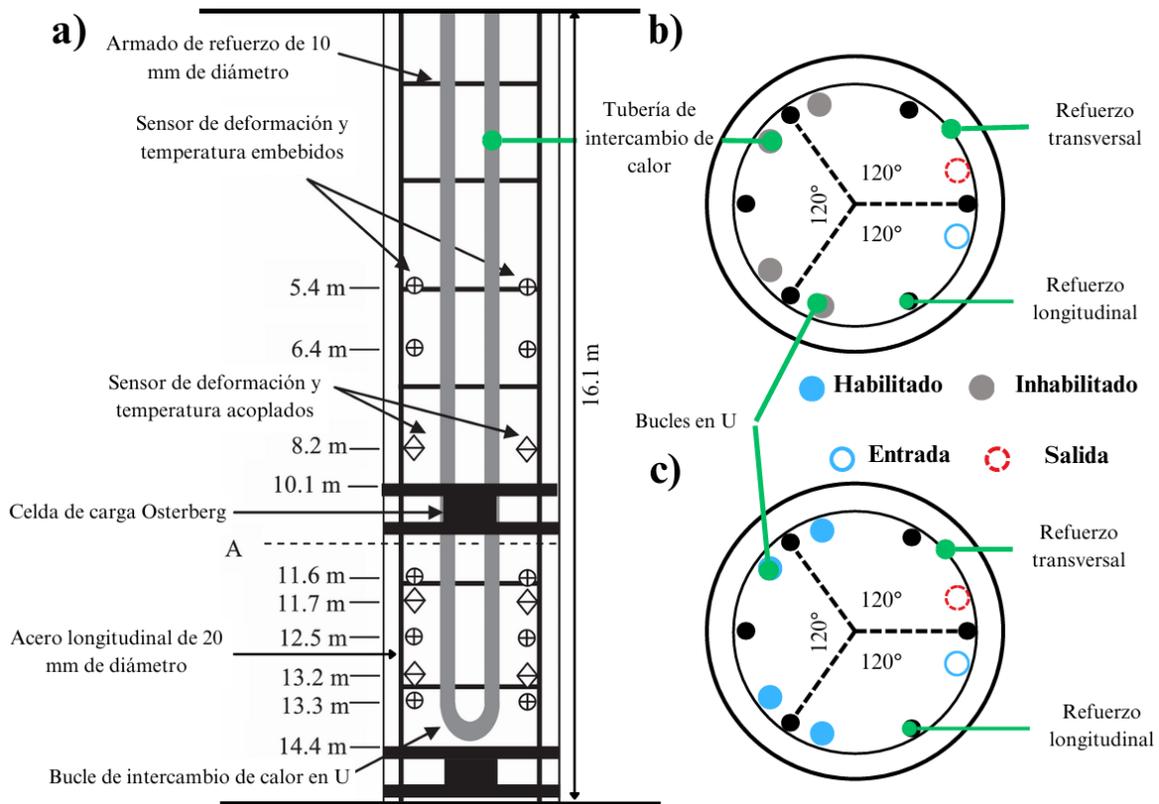


Figura 3.8 a) Vista longitudinal e instrumentación de la pila, los círculos con cruz son los sensores embebidos EMB y los rombos con raya son los sensores acoplados SIS, b) Corte transversal de la pila funcionando con un solo bucle en U y c) Corte transversal de la pila funcionando con los tres bucles de U en serie (adaptado de Singh *et al.*, 2015)

Tabla 3.9 Parámetros utilizados en el código *RTEMP* para la obtención de los cambios de temperatura representativos en el caso de pila de energía con celdas Osterberg

Parámetro	λ ($W m^{-1} K^{-1}$)	C_p ($J kg^{-1} K^{-1}$)	C_v ($J m^{-3} K^{-1}$)	ρ ($kg m^{-3}$)	D_T ($m^2 s^{-1}$)	L (m)	D (m)	N (Cantidad)	d (mm)
Material	Suelo Pila	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Pila	Pila	Tubos	Tubos
Valor	1.9 1.4	-	1950000	-	9.74359E-07	16.1	0.6	2 y 6	25

Nota: λ es la conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), C_p capacidad calorífica específica ($J kg^{-1} K^{-1}$), C_v capacidad calorífica volumétrica ($J m^{-3} K^{-1}$), ρ la densidad ($kg m^{-3}$), D_T difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$), L longitud de la pila (m), D diámetro de la pila (m), N cantidad de tubos de intercambio de calor y d diámetro exterior de la tubería de intercambio de calor (mm).

3.4.1 Análisis de resultados

En la Figura 3.9 se presentan primero tres de los 16 registros de temperatura por prueba. Para las dos pruebas con tres bucles en funcionamiento (Figura 3.9b y Figura 3.9c), se presenta el registro del cambio de temperatura a las profundidades de 13.3 (EMB 9), 5.4 (EMB 1) y 8.2 m (SIS 1) que conforman un margen entre la máxima, mínima y media temperatura, respectivamente, obtenida por los diferentes sensores colocados en la estructura. Para el caso con un bucle en funcionamiento (Figura 3.9a), se tienen los mismos registros con la diferencia del sensor que registra la máxima temperatura a la profundidad de 12.5m (EMB 7). Se observa que los resultados obtenidos con el código (*RTEMP*) siguen la tendencia de los registros en campo (Singh *et al.*, 2015). En el caso donde se evalúan 3-Bucles CP (Figura 3.9b), los datos simulados presentan un perfil más bajo y apenas logran alcanzar valores cercanos a los medidos.

Es importante señalar que, las temperaturas más altas registradas en campo midieron a una profundidad de 12.5 y 13.3 m (EMB 7 y EMB 9, respectivamente, en la Figura 3.9), mientras que las más bajas a una profundidad de 8.2 m (por el sensor SIS 1 a la mitad de la pila) en los tres casos. Por otro lado, en los dos casos con tres bucles en funcionamiento, la temperatura media se registró en la sección superior de la pila a una profundidad de 5.4 m (EMB 1 en la Figura 3.9). Los autores indican que la temperatura aumenta conforme a la profundidad debido a la presencia de capas del suelo cada vez más densas con un alto contenido de cuarzo (Singh *et al.*, 2015). Lo anterior demuestra la influencia de la estratigrafía en la respuesta térmica de la pila y como el método analítico es capaz de proporcionar resultados adecuados considerando un medio homogéneo (como en los casos anteriores).

En los tres casos de prueba, el código presenta una buena estimación de la temperatura inicial de la pila, con un error de 0.61% (0.1°C) para la prueba 1-Bucle CP y de 16.86% (2.9°C) en las demás pruebas. No obstante, los resultados obtenidos con *RTEMP* en general son más bajos que la temperatura media registrada en campo, ya que evalúa la temperatura en todo el volumen de la pila y su sección transversal. Dicho comportamiento explica la reducción de la temperatura observada durante los primeros nueve días en las pruebas con 3-Bucles. En la Figura 3.9 se observa que, al finalizar la etapa de calentamiento y registrarse el pico de temperatura, se inicia un periodo de enfriamiento natural, similar al caso anterior, donde se detalla la disminución progresiva en la magnitud de los resultados del código.

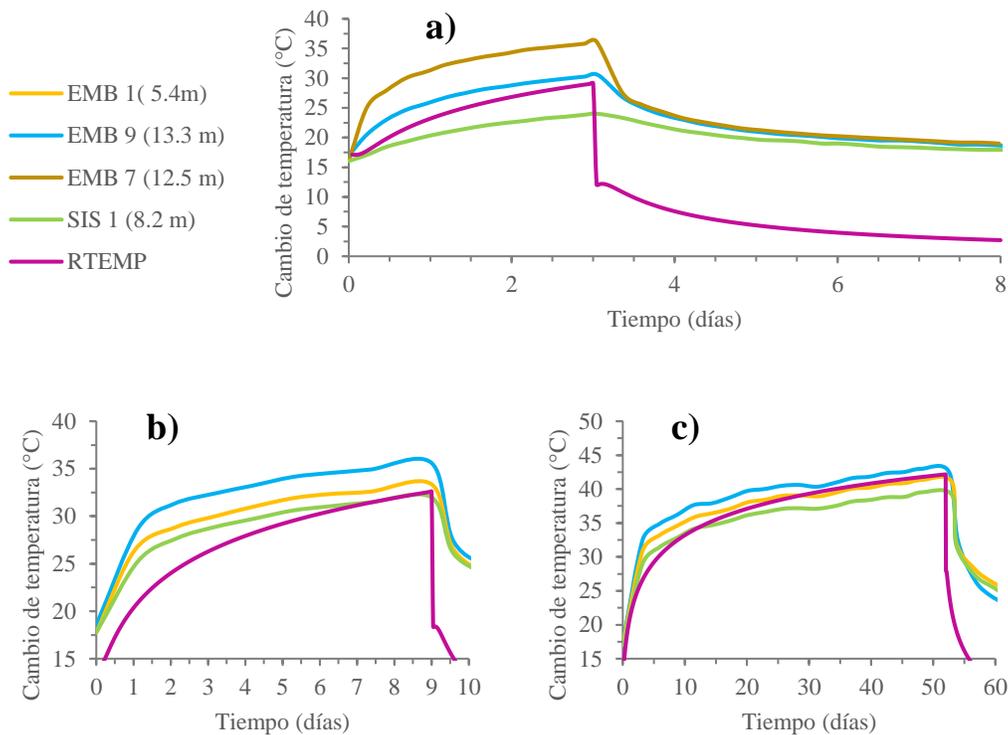


Figura 3.9 Resultados de pruebas de calentamiento en pilas de energía con diferente configuración del circuito primario y diferente esquema de prueba: a) 1-Bucle CP, b) 3-Bucles CP y c) 3-Bucles LP (adaptado de Murphy *et al.*, 2015)

La estrategia de instrumentación implementada, que consistió en colocar sensores cerca, lejos de la tubería y en puntos opuestos a lo largo de la pila, permitió obtener un promedio de los 16 registros tomados en cada prueba para compararlos con los resultados de *RTEMP* y validar la precisión del código. En la Figura 3.10 se observa que los resultados obtenidos con *RTEMP* presentan un buen ajuste respecto al promedio de las mediciones de campo, con un error relativo del 3.41, 5.67 y 11.82 %, equivalentes a 1.14, 1.39 y 3.39°C en las pruebas 3-Bucles LP, 1-Bucle CP y 3-Bucles CP, respectivamente. Asimismo, se aprecia que, durante los primeros tres días de cada prueba, el código presenta una magnitud de temperatura menor respecto al promedio de las mediciones de campo; sin embargo, conforme avanza en el tiempo, dicho error se reduce de manera significativa. Este comportamiento se explica por el fenómeno de flujo estacionario de calor, en el cual el cuerpo alcanza un punto de equilibrio térmico donde la temperatura se estabiliza. El tiempo necesario para alcanzar dicho punto depende las propiedades térmicas de los materiales. Una prueba de mayor duración, para este caso, hubiera sido acertada para analizar los resultados del código a largo plazo.

Es importante señalar que, en lo referente a la cantidad de tubos, el código fue calibrado considerando la siguiente hipótesis: a mayor cantidad tubos, menor cambio de temperatura; y a menor cantidad de tubos, mayor cambio de temperatura (Anexo I). Aunque este

CAPÍTULO 3

comportamiento es contrario a lo descrito en el apartado 2.2.1, el algoritmo muestra un buen ajuste con las mediciones de campo al variar la cantidad de tubos en cada prueba, lo que demuestra una mayor concordancia con los resultados experimentales (Singh *et al.*, 2015) que con lo establecido teóricamente (Song *et al.*, 2022), al igual que en el caso anterior (apartado 3.3).

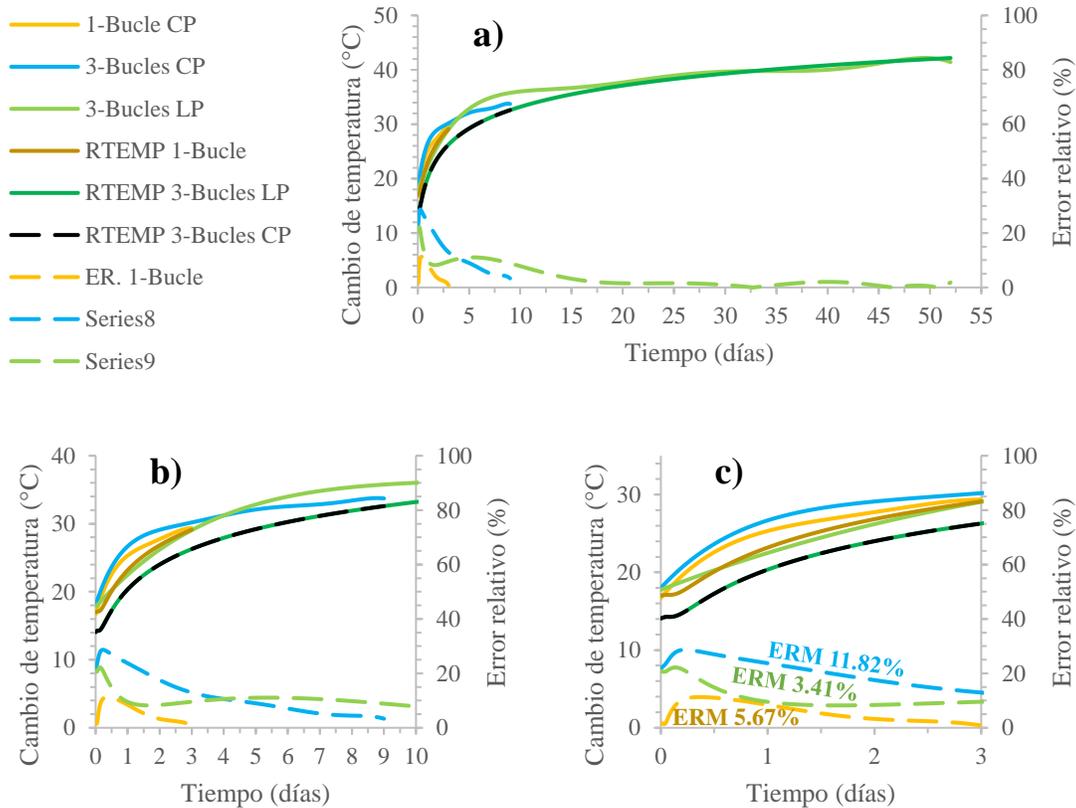


Figura 3.10 Resultados, error relativo de *RTEMP* y la tendencia promedio de las mediciones en campo de diferentes pruebas en una pila de energía: a) vista completa, b) ampliación a 10 días (fin de prueba 3-Bucles CP) y c) ampliación a tres días (fin de prueba 1-Bucle CP) con error relativo medio de las tres pruebas

En la Figura 3.11 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos en las tres pruebas, al final del periodo de calentamiento. Las mediciones en campo, representadas con rótulos en guion (1-Bucle CP), círculo (3-Bucles CP) y triángulo (3-Bucles LP), corresponden a las obtenidas por los 16 sensores de la pila, mientras que la tendencia promedio de estas mediciones (Singh *et al.*, 2015) está representada por un segmento de recta amarillo en los tres casos de prueba. En la leyenda, los perfiles con el número de días corresponden a cada prueba de acuerdo con su duración: 3 días para 1-Bucle CP, 9 días para 3-Bucles CP y 52 días para 3-Bucles LP. Estos perfiles fueron obtenidos con el código *RTEMP*. La temperatura

representativa obtenida con el código se indica con una línea discontinua separada por dos puntos.

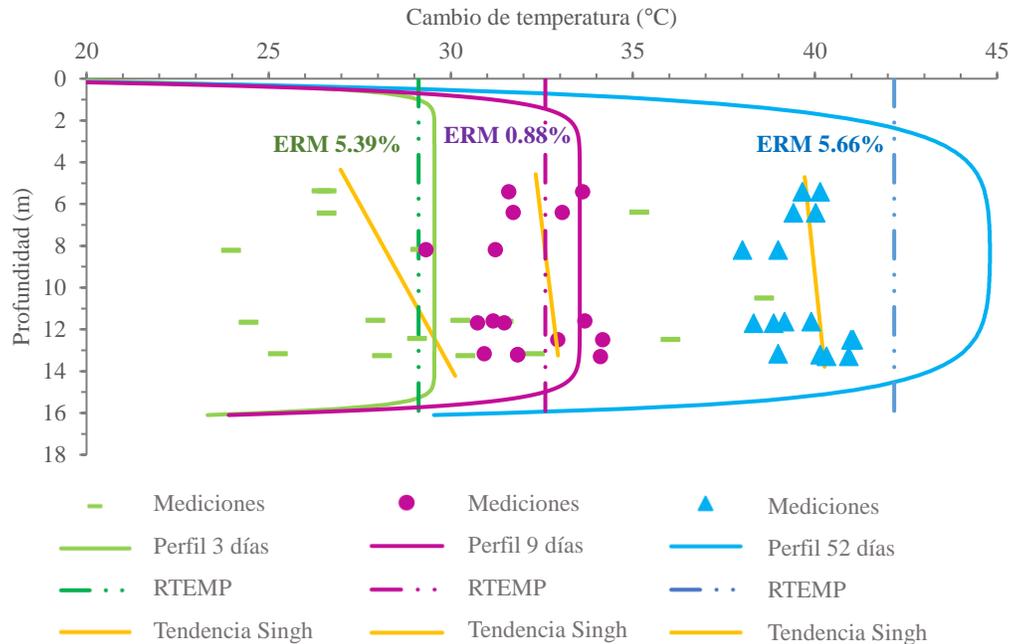


Figura 3.11 Perfil de temperatura de las pilas de energía en tres pruebas con diferente tubería. Por la duración de prueba, de izquierda a derecha están en verde los resultados de la prueba 1-Bucle CP, en rosa los de 3-Bucles CP y en azul los de 3-Bucles LP (adaptado de Singh *et al.*, 2015)

Estos perfiles permiten evaluar la distribución de la temperatura a lo largo de la pila de energía en distintas etapas. Es esencial analizar el perfil al final de la prueba para encontrar los efectos resultantes y el perfil en los valores máximos de carga térmica, que no siempre corresponden al final de los ciclos de carga. Este caso representa el perfil en el pico de carga que coincide con el final de ciclo, por lo que los valores corresponden a la respuesta térmica resultante y máxima. En este punto, el código exhibe valores muy similares a los resultados *in situ*. Sin embargo, en la prueba 3-Bucles LP es notable la diferencia de aproximadamente 2.25°C (5.66%) entre el perfil medido y el calculado a largo plazo. Esta diferencia se debe a la variación de los sensores al momento de capturar los datos, y es un ejemplo de las limitaciones que presenta el método analítico. Si no se tienen suficientes puntos de observación, se pueden encontrar diferencias significativas en los resultados. En las pruebas 3-Bucles CP y 1-Bucle CP el error es menor, del 0.88 % (0.28°) y 5.39% (1.47°), respectivamente. Es importante señalar que, en todos los casos, la temperatura representativa es la que más se aproxima al promedio de las mediciones de campo. Algunos autores sugieren que las pilas de energía se diseñen con base en este valor (Laloui y Rotta-Loria, 2019; Song *et al.*, 2022; Zeng *et al.*, 2002). Esto demuestra que el método analítico programado es adecuado para el diseño de las pilas de energía.

3.5 Análisis del comportamiento termo-mecánico a corto plazo

Las pilas de energía pueden estar sujetas a distintos tipos de operación que dependen de la demanda energética del edificio. En general, existen dos tipos de operación: extracción/inyección pura o extracción/inyección estacional. El primero se refiere a un flujo de calor unidireccional, mientras que el segundo implica un flujo de calor cíclico bidireccional. Ambos modos funcionan a largo o corto plazo. Dado que la metodología evaluada tiene un buen ajuste para el cálculo del cambio de temperatura representativo a largo plazo, es importante analizar qué tan significativo puede ser el error en la magnitud del cambio de temperatura al aplicarlo en el diseño termo-mecánico de pilas de energía que operen a corto plazo.

Para estudiar el sesgo en las estimaciones del código respecto al cambio de temperatura a corto plazo, se llevó a cabo una evaluación del comportamiento termo-mecánico de una pila de energía hipotética, utilizando el programa *EPiles* (Arizmendi, 2021). Esta evaluación consideró las condiciones geométricas, geotécnicas y estructurales descritas en el apartado 4, y utilizó como referencia los resultados obtenidos a partir del cambio de temperatura *in-situ* de cada una de las pilas evaluadas previamente. Las dos pilas presentadas en el apartado 3.2 no se incluyeron en este análisis, ya que sus resultados del cambio de temperatura están más relacionados con las características de la tubería de intercambio de calor que con la pila.

La evaluación del comportamiento termo-mecánico consistió en un análisis paramétrico enfocado en estudiar la influencia de diversos cambios de temperatura y cargas mecánicas. Así, se determinaron los valores del cambio de temperatura en el momento de mayor error entre los resultados *in-situ* y los obtenidos con *RTEMP* para determinar qué tan significativo es el sesgo del código respecto a los resultados *in-situ*. La Tabla 3.10 presenta el resumen de estos valores ordenados por caso, así como el momento en que se presentan (pilas 4 y 5 no se tomaron en cuenta). Las cargas aplicadas son de 3,131.54 kN y 2,613.24 kN, que corresponden a las combinaciones 1 y 2 descritas en el apartado 4.3.2, respectivamente. Siguiendo la metodología de diseño-termo-mecánico presentada en el apartado 4.3, se considera que los valores del cambio de temperatura indicados en la Tabla 3.10 se ven afectados por su respectivo factor para cada combinación de carga (ver apartado 4.3.2), suponiendo que estos representan los valores de máxima intensidad alcanzados y evaluados en cada caso.

En resumen, cada una de las siete pilas fue evaluada bajo dos casos de carga (combinación 1 y 2), y cada caso se analizó considerando dos cambios de temperatura (*in-situ* y *RTEMP*). Este enfoque permitió evaluar la influencia de diferentes incrementos de temperatura y el comportamiento ante aumentos y reducciones de carga mecánica. La Figura 3.12 y la Figura 3.13 presentan los resultados de la distribución de carga axial y desplazamientos de la pila, respectivamente. Los resultados de las pilas 1 y 2 se presentan en una sola serie a partir de

aquí, ya que sus cambios de temperatura son muy pequeños y no generan diferencias significativas en los resultados. En general se observa que los mayores efectos se presentan en las pilas con mayores cambios de temperatura. Específicamente la pila 3 presenta mayor carga axial y los mayores desplazamientos. Le siguen, en orden decreciente las pilas 2, 1, 7, 8, 9 y 6.

Tabla 3.10 Camios de temperatura representativos en el momento de mayor error entre las mediciones *in-situ* y *RTEMP*

Pilas	Cambios de temperatura representativos								
	Wu <i>et al.</i> (2020)			Brettman y Anis (2011)		Murphy <i>et al.</i> (2014)	Singh <i>et al.</i> (2015)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>In-situ</i> (máx)	23.07	23.23	24.84	-	-	17.85	21.49	21.24	18.4
<i>RTEMP</i> (mín)	20.15	20.15	20.51	-	-	14	19.07	15.15	14.33
Error abs. (°C)	2.92	3.08	4.33	-	-	3.85	2.42	6.09	4.07
Error rel. (%)	12.66	13.26	17.43	-	-	21.57	11.26	28.67	22.12
Tiempo (h)	40	40	45	-	-	33	9	6	3

Nota: 1 es pila Espiral *In-Situ*, 2 pila U-Serie, 3 pila U-Paralelo, 7 pila 1-Bucle CP, 8 pila 3-Bucles CP y 9 pila 3-Bucles LP.

En la Figura 3.12 se observa que la distribución de la carga axial es similar en todos los casos analizados para ambas combinaciones de carga. Lo anterior se debe, por una parte, a que la carga mecánica no varía entre las pilas dentro de cada combinación. Por otra parte, los cambios de temperatura considerados tienen valores cercanos, alrededor de los 20 grados (sin incluir el factor de carga), lo que explica que los efectos térmicos sean también similares. No obstante, es posible apreciar diferencias en la distribución de carga axial entre los resultados obtenidos a partir de los cambios de temperatura *in-situ* y los obtenidos con el código *RTEMP*. En todos los casos, los valores obtenidos con *RTEMP* son menores respecto a los *in-situ*.

Revisando el estado límite de falla, de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 4.3.3, se determinó que las pilas 1, 2 y 3, en la combinación 1 (Figura 3.12a), exceden los límites permisibles de carga axial aplicada cuando se encuentran sometidas a los efectos del cambio de temperatura obtenido *in-situ*. Ninguna de las demás pilas en ambas combinaciones supera estos límites. Sin embargo, es importante señalar que algunas de las pilas en la combinación 2 (Figura 3.12b), específicamente la 1, 2, 3 y 7, casi superan la capacidad de carga reducida de la pila igual a 4,029.55 kN (ver apartado 4.3) cuando se encuentran sometidas al cambio de temperatura obtenido *in-situ*.

CAPÍTULO 3

En general, un incremento de temperatura genera la aparición de fricción negativa en la parte superior de la pila, debido a la expansión a partir del eje nulo. A medida que aumenta el cambio de temperatura, la fricción negativa persiste. En cambio, un aumento de carga mecánica disminuye esta fricción. Este comportamiento permite explicar por qué las pilas 1, 2, 3 y 7 se aproximan al límite permisible de carga aplicada en la combinación 2, Al tener menor carga mecánica y un mayor cambio de temperatura aplicado, los efectos térmicos tienen un impacto más significativo en la distribución de la carga axial respecto a la combinación 1. Por otro lado, en la combinación 1, al tener una mayor carga mecánica y menores cambios de temperatura, se reducen los efectos térmicos, disminuyendo la fricción negativa y aumentando la fricción positiva, que contribuye a la capacidad de carga.

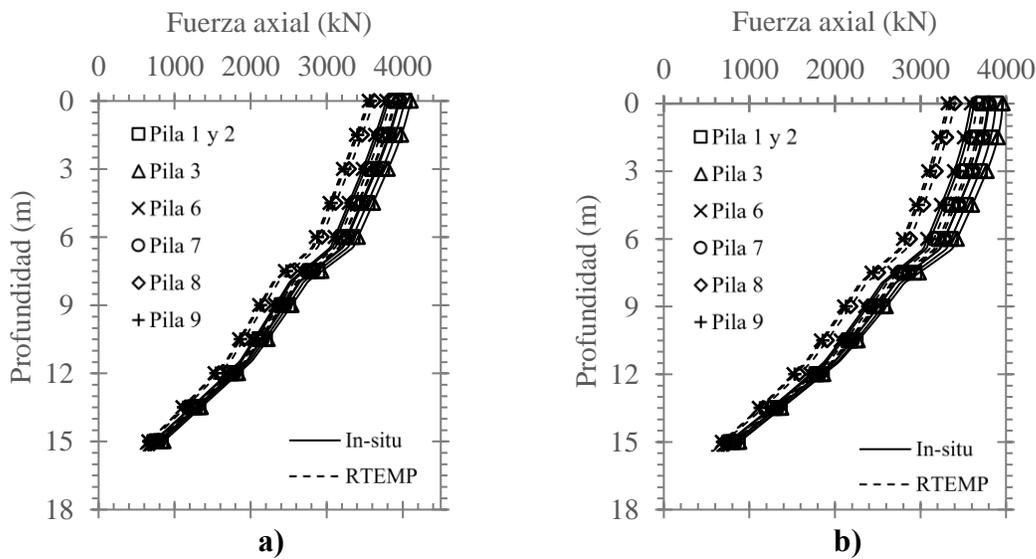


Figura 3.12 Distribución de carga axial termo-mecánica con la profundidad: a) Combinación 1, b) Combinación 2

En la Figura 3.13 se presenta la distribución de desplazamientos para las distintas combinaciones de carga evaluadas. En general, se observa que en la sección superior (hasta los tres metros de profundidad en la Figura 3.13a y hasta los 4.5 m en la Figura 3.13b) los desplazamientos tienden a reducirse con la profundidad, mientras que en la sección inferior incrementan. Este comportamiento se debe al fenómeno de expansión por calentamiento de la pila, donde la sección superior se desplaza hacia arriba, contrarrestando los desplazamientos generados por la carga mecánica, y la sección inferior hacia abajo, contribuyendo a los desplazamientos generados por la carga mecánica. Por este motivo, y debido a los mayores cambios de temperatura, todas las pilas en la combinación 2 (Figura 3.13b) presentan mayores desplazamientos en la sección inferior respecto a la combinación 1(Figura 3.13a). En ambas combinaciones, ninguna de las pilas rebasó el estado límite de servicio, de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 4.3.4.

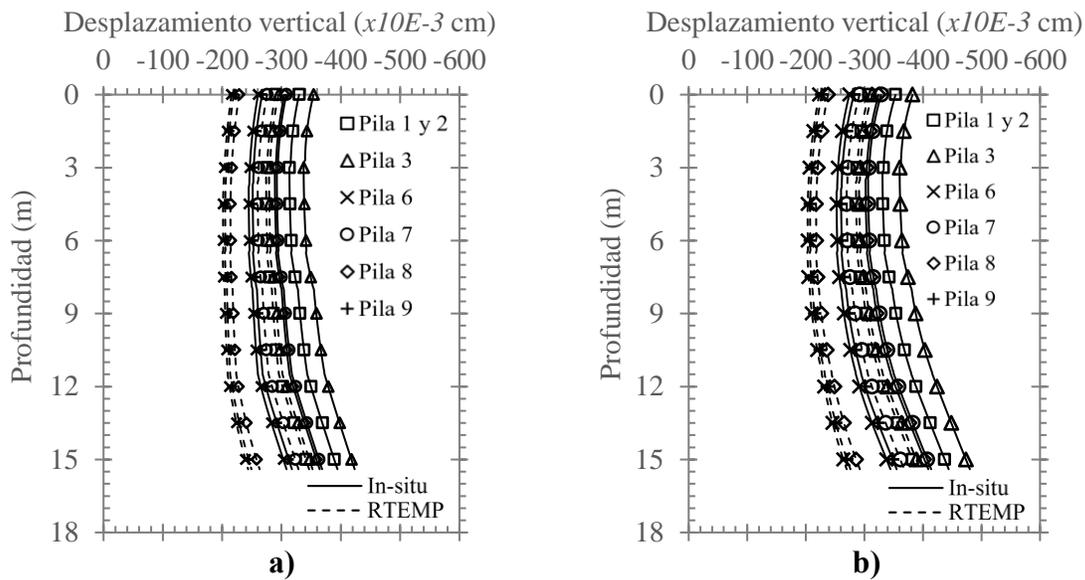


Figura 3.13 Desplazamiento vertical de las diferentes pilas, a) Combinación 1, b) Combinación 2

La Tabla 3.11 y la Tabla 3.12 presentan el resumen de resultados del comportamiento termo-mecánico de las diferentes pilas bajo las combinaciones de carga 1 y 2, respectivamente. Los resultados obtenidos con el cambio de temperatura *in-situ* se presentan subrayados con el tono de gris más oscuro, mientras que los resultados obtenidos con *RTEMP* están destacados en gris claro. El error absoluto (en kN y cm) y el error relativo (%) se encuentran subrayados en blanco. En general se observa que los efectos termo-mecánicos y térmicos, fuerza axial y desplazamiento vertical, son mayores en todas las pilas afectadas por el cambio de temperatura *in-situ* respecto a lo obtenido con el código, en ambas combinaciones de carga. Los efectos mecánicos, en cada combinación, presentan diferencias cercanas a cero, debido a que la carga mecánica aplicada no varía. Por otra parte, se aprecia que los efectos térmicos tienen un mayor impacto en la combinación 2 que en la combinación 1, debido a que la magnitud del cambio de temperatura es mayor. Mientras que, los efectos de la carga mecánica tienen mayor impacto en la combinación 1 que en la combinación 2. Esto confirma el comportamiento de la distribución de carga axial y de desplazamientos mencionadas anteriormente.

Tabla 3.11 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 1

Pilas		1 y 2	3	6	7	8	9
Fuerza axial (kN)	Termo-mecánica	2710.07	2765.60	2522.68	2658.22	2647.08	2545.99
		2613.10	2621.28	2319.19	2574.50	2384.07	2337.35
		96.97	144.32	203.49	83.72	263.01	208.64
		3.92%	5.81%	9.20%	3.42%	11.48%	9.31%

*EVALUACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA LA
DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA
REPRESENTATIVOS EN PILAS DE ENERGÍA*

CAPÍTULO 3

Continuación: Tabla 3.11 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 1

Pilas		1 y 2	3	6	7	8	9	
Fuerza axial (kN)	Mecánica	1884.02	1882.22	1882.64	1884.19	1882.32	1882.60	
		1883.52	1881.34	1881.30	1883.75	1880.75	1880.80	
		0.50	0.88	1.34	0.44	1.57	1.79	
		0.02%	0.04%	0.07%	0.02%	0.08%	0.09%	
	Térmica	826.05	883.38	640.04	774.03	764.77	663.40	
		729.58	739.94	437.89	690.75	503.33	456.55	
		96.47	143.44	202.15	83.28	261.44	206.85	
		13.31%	19.49%	45.34%	12.10%	51.26%	44.47%	
		Termo- mecánico	-334.78	-361.18	-258.90	-311.31	-307.74	-266.40
			-291.53	-296.91	-210.16	-275.76	-224.11	-214.16
-43.25	-64.27		-48.74	-35.55	-83.63	-52.24		
14.83%	21.64%		23.11%	12.89%	37.24%	24.31%		
Desplaza- miento vertical ($\times 10^{-3}$ cm)	-106.59		-106.48	-106.51	-106.60	-106.49	-106.51	
	-106.56		-106.43	-106.43	-106.57	-106.40	-106.40	
	-0.03	-0.05	-0.08	-0.03	-0.09	-0.10		
	0.02%	0.04%	0.07%	0.02%	0.08%	0.09%		
	Térmico	-228.20	-254.70	-152.39	-204.71	-201.25	-159.89	
		-184.98	-190.47	-103.73	-169.19	-117.71	-107.75	
-43.22		-64.22	-48.66	-35.53	-83.54	-52.14		
25.42%		36.53%	58.74%	23.13%	84.73%	59.55%		

Tabla 3.12 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 2

Pilas		1 y 2	3	6	7	8	9	
Fuerza axial (kN)	Termo- mecánica	2721.73	2772.46	2500.91	2661.51	2657.60	2528.52	
		2607.92	2627.86	2263.26	2561.87	2335.29	2283.37	
		118.55	146.11	247.15	102.67	331.15	253.81	
		4.55%	5.56%	10.92%	4.01%	14.18%	11.12%	
	Mecánica	1550.88	1551.93	1552.16	1550.87	1553.33	1551.67	
		1550.68	1552.88	1552.16	1551.88	1550.15	1551.30	
		0.21	0.97	0.07	1.02	3.23	0.38	
		0.01%	0.06%	0.00%	0.07%	0.21%	0.02%	
		Térmica	1170.85	1220.53	948.75	1110.64	1104.27	976.84
			1057.24	1074.99	711.10	1009.99	785.14	732.07
113.66	142.92		233.60	99.68	313.39	240.26		
10.75%	13.29%		32.85%	9.87%	39.92%	32.82%		

Continuación: Tabla 3.12 Resultados promedio de fuerza axial y desplazamiento vertical en todo el elemento debidos a cargas termo-mecánicas bajo la combinación 2

Pilas		1 y 2	3	6	7	8	9
Desplazamiento vertical ($\times 10^{-3}$ cm)	Termo-mecánico	-361.74	-394.13	-274.92	-334.69	-330.04	-283.52
		-311.97	-317.70	-219.31	-294.14	-235.56	-223.99
		-49.85	-76.55	-55.41	-40.58	-94.31	-59.33
		15.98%	24.09%	25.27%	13.80%	40.04%	26.49%
	Mecánico	-87.73	-87.79	-87.80	-87.73	-87.87	-87.77
		-87.72	-87.84	-87.80	-87.78	-87.69	-87.75
		-0.01	-0.06	0.00	-0.06	-0.18	-0.02
		0.01%	0.06%	0.00%	0.07%	0.21%	0.02%
	Térmico	-274.01	-306.34	-187.12	-246.96	-242.17	-195.75
		-224.26	-229.86	-131.51	-206.35	-147.87	-136.24
		-52.57	-80.63	-62.24	-43.14	-103.64	-66.16
		23.44%	35.08%	47.33%	20.90%	70.08%	48.56%

Los resultados anteriores permiten entender la influencia de los cambios de temperatura en el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía y la magnitud de sus efectos. En la combinación 2, donde los cambios de temperatura son mayores, los efectos casi alcanzan valores muy cercanos a los obtenidos con cargas mecánicas mayores que provocan la falla, como en la combinación 1 en el caso de las pilas 1, 2 y 3, a pesar de contar con cambios de temperatura menores.

Es importante señalar que, aunque el código alcanzó una estimación precisa en la respuesta inicial en todos los casos evaluados anteriormente, mantuvo un sesgo significativo en las primeras horas de análisis, entre 3 y 45 horas, de acuerdo con la Tabla 3.10. Esto es habitual en modelos de respuesta térmica basados en el modelo FLSM (*Finite Line Source Model*, por sus siglas en inglés). No obstante, es importante tomar esto en cuenta para los diferentes periodos de análisis, ya que, aunque a corto plazo el sesgo puede parecer insignificante, un error considerable en la magnitud del cambio de temperatura (error absoluto en la Tabla 3.10) podría ser suficiente para superar el estado límite de falla, como se demostró en este apartado.

Con los análisis realizados anteriormente, se concluye que subestimar la magnitud del cambio de temperatura representativo puede conducir a errores significativos en el comportamiento termo-mecánico de la estructura. En consecuencia, los efectos reales pueden pasar desapercibidos, resultando en el incumplimiento de los estados límite de falla y de servicio. Por lo tanto, es imprescindible considerar el sesgo de las estimaciones del cambio de temperatura representativo a corto plazo con la metodología descrita en el apartado 2.2.

Dependiendo las condiciones de diseño (geotécnico, estructural y térmico), el uso de la metodología evaluada se recomienda para análisis a largo plazo, preferentemente en periodos

mayores a 50 horas. Para análisis a corto plazo (menores a 50 horas), esta metodología puede ser usada para obtener resultados preliminares en el diseño termo-mecánico de pilas de energía. No obstante, se sugiere realizar análisis termo-mecánicos por modelación numérica para estudiar con mayor detalle la precisión de dicha metodología en escenarios a corto plazo.

3.6 Análisis y resumen de resultados de la evaluación al método analítico para la obtención de los cambios de temperatura representativos para el diseño termo-mecánico de pilas de energía

Los resultados derivados de los análisis anteriores demuestran que el modelo analítico programado simula de forma adecuada la respuesta térmica de las pilas de energía, con mejores aproximaciones conforme avanza el tiempo. A pesar de considerar hipotéticamente un medio homogéneo, que implica la aplicación de un valor promedio de las propiedades térmicas de la pila y el suelo, el modelo estima adecuadamente los cambios de temperatura. Asimismo, el criterio para estimar la resistencia térmica del concreto y el principio de superposición implementados muestran un buen ajuste al representar este fenómeno bajo diversas condiciones de cargas térmicas, configuraciones del circuito primario, periodos de prueba y diámetros de pila. La Tabla 3.13 resume las conclusiones obtenidas en los análisis realizados sobre los factores mencionados y presentados al inicio de este apartado. Se observó un error máximo cercano al 15% en los distintos casos analizados, lo que corresponde a un cambio de temperatura de aproximadamente 3.5°C. Además, se estimó un error promedio inferior al 15%, entre 1 y 3.5°C, lo que indica que el método tiene un buen nivel de confianza (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b). No obstante, es importante tomar en cuenta el sesgo de sus estimaciones a corto plazo, por lo que resulta más confiable en análisis a largo plazo.

Lo anterior demuestra que el modelo analítico implementado es una herramienta confiable y sencilla para evaluar la respuesta térmica de las pilas de energía. Dicho método se plantea como una alternativa al modelado numérico y puede utilizarse para simplificar el diseño termo-mecánico de pilas de energía al integrarse con métodos de análisis desacoplados. Por ejemplo, el método de transferencia de cargas descrito en el apartado 2.3 utiliza un único valor del cambio de temperatura en todo el volumen de la pila. Dicho valor se puede determinar con el método examinado en esta tesis. Gracias a ello, es posible optimizar el dimensionamiento de los elementos al analizar las condiciones reales de carga, dejando de lado procedimientos conservadores.

Tabla 3.13 Resumen de evaluación de los resultados de *RTEMP* contra los de diferentes casos

Factores/Pruebas	Casos									
	Wu <i>et al.</i> (2020)			Brettman y Anis (2011)		Murphy <i>et al.</i> (2014)	Singh <i>et al.</i> (2015)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Observación	<i>In situ</i> Espiral	Modelado numérico U-Serie	Modelado numérico U-Paralelo	<i>In situ</i> D= 0.3 m Sensores cerca de tubería	<i>In situ</i> D= 0.45 m Sensores cerca de tubería	<i>In situ</i>	<i>In situ</i> 1 Bucle en U Corto plazo	<i>In situ</i> 3 Bucles U- Serie Corto plazo	<i>In situ</i> 3 Bucles U- Serie Largo plazo	
Tiempo	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Sesgado	Aceptable	Aceptable	
Carga térmica	En todos los casos la carga térmica es constante y el principio de superposición implementado refleja bien los efectos de la carga a lo largo del tiempo									
Configuración del circuito primario	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	
Criterio de resistencia térmica del concreto	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	
Diámetro de pila	En todos los casos se mantiene un diámetro constante, excepto en el de Brettman y Anis (2011). En todos los casos se refleja adecuadamente el impacto de diferentes diámetros con resultados confiables y coherentes									
Cambio de temperatura de diseño	Confiable	Confiable	Aceptable	No representativo	No representativo	Confiable	Confiable	Confiable	Confiable	
Estratigrafía del suelo	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	Bien reflejado	
Error máx.	%	12.68	13.27	17.41	29.22	40.00	21.59	11.28	28.64	22.16
	°C	2.93	3.08	4.32	8.67	12.30	3.86	2.42	6.08	4.07
Error mín.	%	1.70	2.76	7.02	5.95	6.00	3.06	0.83	3.33	1.17
	°C	0.43	0.87	2.33	2.20	2.24	0.89	0.24	1.12	0.47
Error medio	%	7.10	7.95	12.19	6.20	15.05	6.56	5.67	11.82	3.41
	°C	1.84	2.10	3.43	2.05	5.21	1.44	1.39	3.39	1.14

4 CASO DE ESTUDIO: RESIDENCIA C73

En este apartado se presenta un ejemplo simplificado del diseño termo-mecánico de una pila de energía, basado en el esquema de la Figura 1.10. Este caso de estudio tiene como objetivo establecer un marco conceptual sobre el proceso de diseño termo-mecánico de pilas de energía, destacando la relevancia del cálculo de los cambios de temperatura que experimenta el elemento durante su operación. Para ello, se implementan las metodologías analíticas descritas en esta tesis para evaluar el comportamiento termo-mecánico de las pilas, siguiendo la propuesta de diseño geotécnico-estructural desarrollada por Arizmendi (2021) para pilas de energía en la Ciudad de México.

Primero, como parte del diseño térmico, se describe el procedimiento para obtener las cargas térmicas horarias de la edificación a partir de las características del proyecto, y se presenta el perfil de cargas del suelo que suministrarán las pilas de energía. Después, se determinan los cambios de temperatura representativos en la pila a partir del perfil de las cargas térmicas del suelo, aplicando la metodología analítica evaluada en esta tesis, en un análisis a corto y largo plazo (uno y 20 años, respectivamente) para estudiar su comportamiento térmico y determinar los valores críticos de temperatura que puede alcanzar a lo largo de su vida útil. Luego, se realiza el diseño geotécnico-estructural de la pila de energía con base en los cambios de temperatura representativos y las características geotécnicas del sitio. Este proceso permite determinar las fuerzas axiales y deformaciones adicionales generadas por las cargas termo-mecánicas, empleando el programa *EPiles* (Arizmendi, 2021) para evaluar los estados límite de falla y de servicio. Finalmente, se realiza una revisión estructural,

obteniendo el diagrama de interacción de la pila y verificando su capacidad para soportar las cargas termo-mecánicas que se aplicarán durante toda su vida útil.

4.1 Diseño térmico

Para llevar a cabo el diseño térmico primero se determinan las solicitaciones térmicas de la edificación y, con base en ello, se estima el cambio de temperatura de diseño. Se definen las características del edificio como: superficie, número de personas que lo habitan, actividades que realizan dentro del inmueble, clima de la región, temperatura promedio ambiente del sitio de estudio, temperatura del suelo, entre otros. Posteriormente, se estima la demanda energética y se selecciona el equipo adecuado (bomba de calor) (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2019). En general, esta parte del diseño desarrollada por un ingeniero de HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* por sus siglas en inglés), ya que suele ser un procedimiento exhaustivo que requiere conocimientos específicos de los diferentes sistemas de calefacción que existen, los requerimientos que requieren, información técnica de los equipos, características y propiedades de los componentes que contribuyen al flujo de calor en la edificación, entre otros. Es posible consultar los conceptos teóricos necesarios para el diseño de las cargas térmicas de un inmueble y el procedimiento de cálculo en algunos manuales como el de la ASHRAE Handbook Fundamentals (American Society of Heating, 2021) o la guía ambiental Guide A: Environmental Design 2021 (Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE, 2015).

Después de determinar la demanda energética del edificio, es necesario evaluar la cantidad de energía que es posible abastecer con el sistema propuesto. Se deben tomar en cuenta los efectos de la demanda en el comportamiento térmico, las propiedades de los componentes involucrados en la transferencia de calor y los diferentes factores que influyen en el diseño y operación de las pilas de energía, como:

- a) **El suelo.** Puede necesitar periodos de recuperación en los que no es posible poner al sistema en funcionamiento o se puede alterar la temperatura del suelo a largo plazo entorpeciendo al sistema (Abdelaziz, 2013; Laloui y Rotta-Loria, 2019; Lazzari *et al.*, 2010). Asimismo, la operación continua del sistema puede provocar una reducción de la capacidad de carga de los estratos poniendo en riesgo a la estructura de cimentación (Feng *et al.*, 2024; Rotta-Loria *et al.*, 2020).
- b) **Capacidad del sistema.** Si el proyecto cuenta con la posibilidad de aumentar la capacidad de extracción de energía del sistema se deben analizar las consecuencias de estas modificaciones desde la perspectiva térmica, económica y estructural. Algunas opciones que permiten mejorar la capacidad del sistema son: incrementar el número de elementos en el suelo, utilizar diferentes materiales con propiedades térmicas que favorezcan la captación y el flujo de calor, instalar una bomba de calor con mayor capacidad, entre otras.
- c) **Diseño del edificio.** En general, este aspecto limita la capacidad del sistema, ya que existen requerimientos estructurales que deben cumplirse y no contribuyen a la

capacidad energética del sistema. En el caso de las pilas de energía, la geometría y propiedades de los materiales son predeterminados con un propósito geotécnico-estructural, lo que limita el dimensionamiento del sistema de captación a los requerimientos estructurales del edificio, reduciendo las posibilidades de optimización (Makasis *et al.*, 2018). Asimismo, por cuestiones de espacio o procedimientos constructivos, no siempre es posible instalar los intercambiadores de forma que cumplan la totalidad de los requisitos térmicos.

El caso de estudio presentado en este apartado es un proyecto sustentable de casa unifamiliar denominado Residencia C73. La vivienda se encuentra localizada al poniente de la Ciudad de México y cuenta con una superficie de 1,023 m². En este proyecto se implementó una cimentación a base de pilas de energía que genera energía eléctrica para la climatización de la casa en invierno y el calentamiento de agua al interior del inmueble durante todo el año. El perfil de las cargas térmicas del proyecto fue obtenido con simulaciones numéricas realizadas por el ingeniero en HVAC con el software de diseño para cargas térmicas *Hourly Analysis Program* (HAP) (López-Acosta *et al.*, 2024). La Figura 4.1 muestra los resultados del cálculo de las cargas térmicas horarias de la Residencia C73. Se observa que, a lo largo del año la totalidad de la demanda de energía se destina a la calefacción del inmueble, con una carga máxima de 22.8 kW y un promedio anual de 2.8 kW.

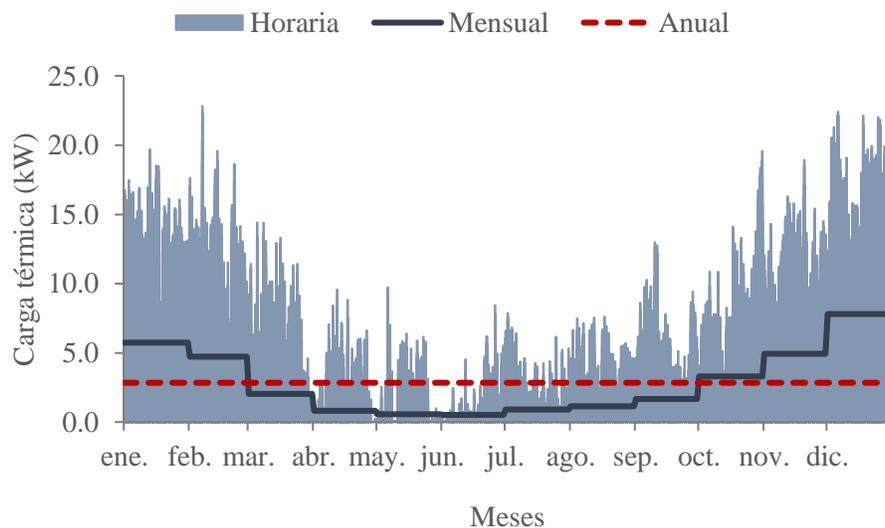


Figura 4.1 Cargas térmicas de diseño para la Residencia C73

4.2 Cálculo de los cambios de temperatura representativos de la pila de energía

El suministro energético de una edificación depende de diversos factores, por lo que es necesario plantear alternativas que permitan satisfacer de manera eficiente tanto los requerimientos energéticos como los estructurales. En el caso de la Residencia C73, la capacidad del sistema se encuentra limitada por el número de elementos instalados para la

extracción de energía, debido a consideraciones de estabilidad geotécnica y estructural. Según López-Acosta, Rivera-Martínez, *et al.* (2022), el sistema instalado satisface únicamente el 25% de la demanda energética requerida por la edificación.

Para determinar los valores máximos de temperatura en las pilas de energía, se considera la máxima capacidad del sistema instalado en la Residencia C73, lo que representa el 25% de la demanda total. La Figura 4.2. muestra el perfil de cargas térmicas correspondiente a dicha capacidad. En este caso, las cargas se indican como positivas, ya que implica un aporte/inyección de calor al interior de la residencia. En el suelo, esto equivale a una extracción de calor que genera su enfriamiento, por lo tanto, para representar este fenómeno, el perfil de las cargas del suelo y los cambios de temperatura en la pila se presentan con signo negativo, tal como se describe a partir del apartado 4.2.2.

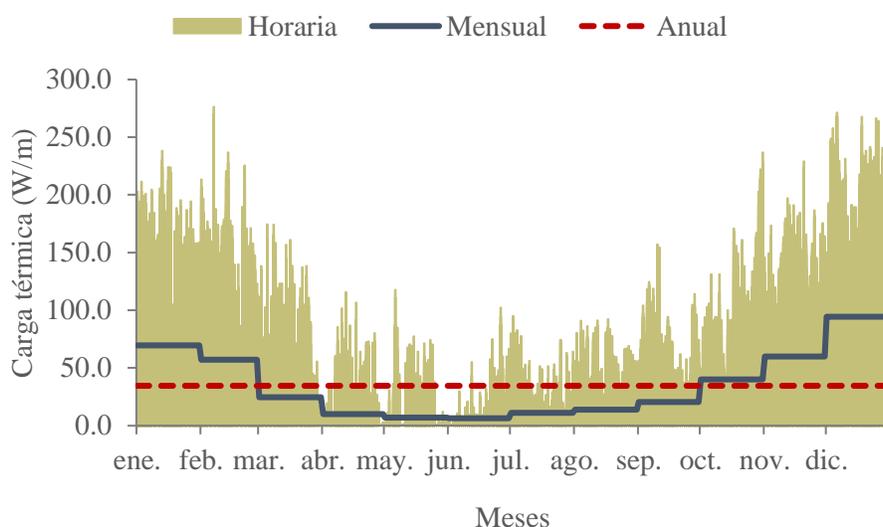


Figura 4.2 Cargas térmicas del suelo para el cálculo del cambio de temperatura representativo en las pilas de energía de la Residencia C73

4.2.1 Geometría y propiedades térmicas de las pilas de energía y del suelo

La Residencia C73 cuenta con ocho pilas de cimentación de 15.5 m de longitud, de las cuales seis son pilas de energía con diámetros de 1.0 m (D1) y 0.8 (D2), con tubería en 4 bucles en U de 33.4 mm, como se muestra en la Figura 4.3. La difusividad y conductividad térmicas se asignaron de acuerdo con los resultados de una prueba TRT, en una pila de 0.8 m de diámetro, indicada en amarillo en dicha figura, realizada por López-Acosta, Barba-Galdámez, *et al.* (2022). La Tabla 4.1 reúne los parámetros necesarios para estimar la respuesta térmica de la pila.

Tabla 4.1 Resumen de parámetros utilizados en el código *RTEMP* para la obtención del cambio de temperatura representativo de la pila de energía

	λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	D_T (m^2s^{-1})	L (m)	D (m)	N (Cantidad)
Pila	2	-	15.5	Pila 0.8 Tubos 0.0334	8
Suelo	1.63	1.4×10^{-6}	-	-	-

Nota: λ es la conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), D_T difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$), L longitud de la pila (m), D diámetro de la pila (m) y N cantidad de tubos de intercambio de calor.

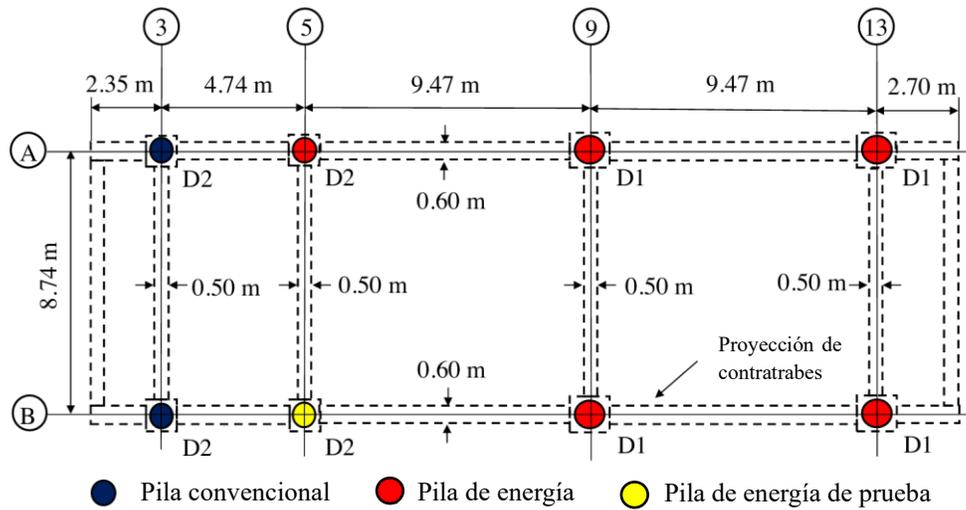


Figura 4.3 Vista en planta de la cimentación de la Residencia C73 (adaptado de López-Acosta *et al.*, 2022)

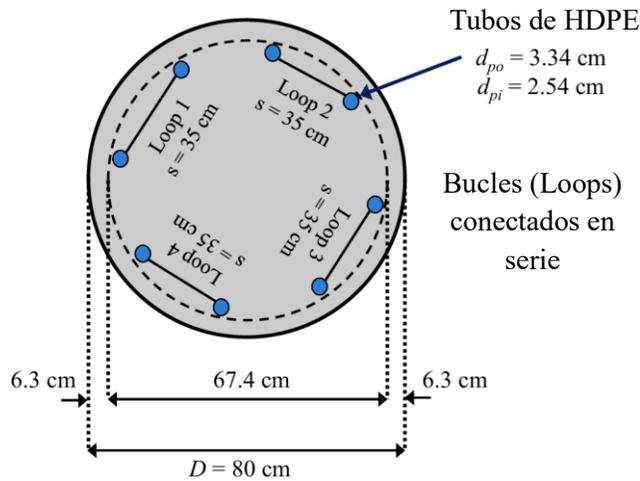


Figura 4.4 Sección transversal de la pila de prueba en la Residencia C73 (adaptado de López-Acosta *et al.*, 2022)

4.2.2 Resultados de respuesta térmica de la pila de energía

El código *RTEMP* (Anexo II) es utilizado para estimar el cambio de temperatura representativo en la pila de energía con los parámetros descritos en el apartado anterior. El tiempo de análisis se propuso igual a 20 años para obtener la respuesta térmica de la pila a largo plazo. Este periodo corresponde al promedio de la vida útil de los componentes del sistema de la bomba de calor; considerando un funcionamiento continuo y al promedio mensual de las cargas térmicas que se repite año con año para analizar el desempeño del sistema (Abdelaziz, 2013; Lazzari *et al.*, 2010).

En la Figura 5.5 se muestran los resultados del cambio de temperatura representativo en la pila de energía, durante un año. Se observa que, la distribución de temperatura en la pila a lo largo del tiempo es proporcional a la magnitud de las cargas térmicas que demanda el edificio. El cambio de temperatura promedio mensual describe un patrón de temperatura más equilibrado a lo largo del año respecto a los resultados de temperatura horaria. Así, se presenta un cambio de temperatura máximo de -25.14°C , que corresponde al periodo de mayor demanda energética entre noviembre-febrero, mismo periodo en el que se presentan las temperaturas ambiente más bajas (López-Acosta, Barba-Galdámez, *et al.*, 2022), y un promedio anual de -9.22°C .

En la Figura 4.6 se muestran los resultados del cambio de temperatura, durante 20 años de operación continua. Se aprecia que el comportamiento de la pila de energía se va estableciendo sin presentar variaciones significativas con el tiempo. Este comportamiento es normal en este tipo de modelos basados en una fuente de línea finita (FLSM, *Finite Line Source Model* por sus siglas en inglés), donde la respuesta térmica tiende a establecerse con el tiempo debido a que la fuente de calor se simula con una longitud finita (Carslaw y Jaeger, 1959; Eskilson, 1987; Li *et al.*, 2016). La temperatura máxima (-25.64°C) incrementa aproximadamente 2% respecto a los de un año y la temperatura mínima (-2.69°C) aproximadamente 0.49%. Sin embargo, la temperatura promedio aumenta de -9.22°C a -11°C , a pesar de que las cargas térmicas son las mismas año con año.

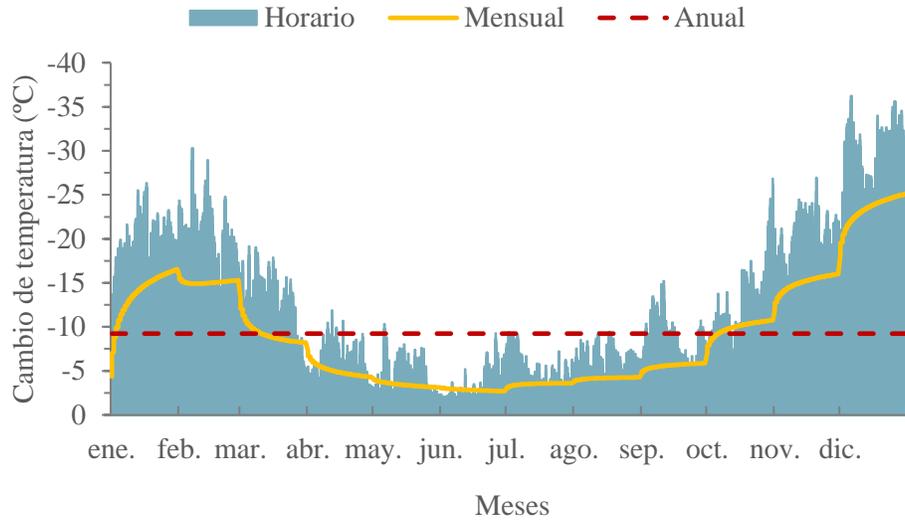


Figura 4.5 Cambios de temperatura horarios y mensuales en una pila de 0.8 m de diámetro en la Residencia C73 simulados durante un año

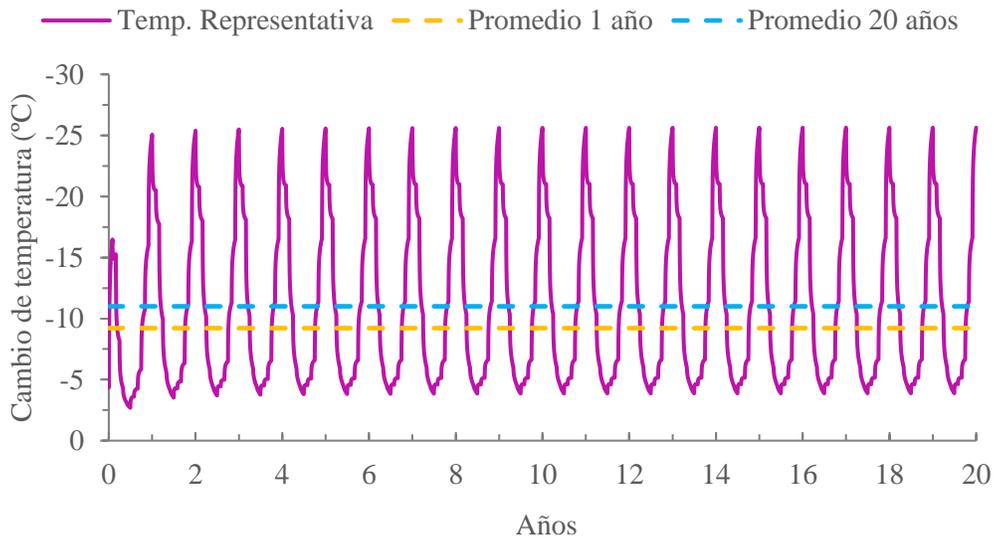


Figura 4.6 Cambios de temperatura representativos de una pila de 0.8 m diámetro de la Residencia C73 en operación continua, simulados durante 20 años

En este caso, la respuesta térmica de la pila se considera como un cálculo individual y sin interferencias térmicas entre las demás pilas. Analizar la pila de energía de manera individual permite obtener estimaciones preliminares sobre su comportamiento termo-mecánico trabajando como grupo. Si se desearan determinar estas interferencias es posible realizarlo con otras metodologías que se enfocan a ello, como la utilizada por Arenas Moreno (2023) para analizar la interferencia térmica de las pilas de la Residencia C73 en diferentes modos

de operación y con diferentes configuraciones de tubería de intercambio de calor. En ese caso se demostró que las interferencias no son significativas a largo plazo (24 años).

Con base en los resultados presentados, se determina que el cambio de temperatura máximo debe ser utilizado para estudiar el comportamiento termo-mecánico de la pila de energía de 0.8 m en la Residencia C73. Este criterio permite evaluar los efectos mecánicos que pueden presentarse en la pila, de manera que, con la revisión estructural, sea posible determinar si la pila puede soportar dichos efectos. Para la revisión geotécnica, se emplea el cambio de temperatura promedio medido durante un periodo de 20 años, considerando su intensidad media para evaluar su impacto acumulativo en la estructura a lo largo de su vida útil.

4.3 Diseño geotécnico

El diseño geotécnico de las pilas de energía debe considerar las solicitaciones del proyecto y las características del suelo, lo que permite determinar la capacidad de carga del suelo y el dimensionamiento del elemento estructural. En etapa del diseño geotécnico-estructural, que constituye la base del presente caso de estudio, es importante destacar las ventajas de las metodologías analíticas para evaluar el comportamiento termo-mecánico y la respuesta térmica de las pilas de energía (tal como se describe en el apartado 2). Estas metodologías permiten, de manera eficiente y económica, estimar el desempeño de las pilas antes de su construcción, asegurando un diseño estructural que garantice tanto la seguridad como la funcionalidad del elemento a lo largo de su vida útil.

La evaluación realizada mediante el modelo analítico presentado en el apartado 3, enfocado en la determinación de los cambios de temperatura en las pilas de energía, demostró que dicho modelo proporciona resultados confiables. Estos resultados pueden ser empleados como una estimación preliminar de la respuesta térmica de las pilas. Este caso de estudio tiene como objetivo resaltar la practicidad de las metodologías analíticas como herramientas para el diseño termo-mecánico de pilas de energía, simplificando el proceso de cálculo y optimizando los recursos necesarios para su implementación.

4.3.1 Propiedades y características del suelo y de la pila

Se llevó a cabo un sondeo exploratorio con recuperación de muestras representativas a cada 2 m, utilizando una herramienta de penetración estándar. Este proceso se complementó con el avance sin muestreo mediante broca tricónica de 3 pulgadas de diámetro, alcanzando una profundidad de exploración de 20.1 m. Entre 16.0 y 18.0 m de profundidad, se utilizó un barril NQ (con broca y rima de diamante) para atravesar fragmentos de roca y boleos no cementados. Adicionalmente, se realizó una exploración presiométrica en el sitio del proyecto, lo que permitió determinar los parámetros mecánicos y la capacidad de carga última ajustada de las pilas, considerando las características del suelo. A continuación, se describe la estratigrafía encontrada durante la exploración, detallando las características del subsuelo hasta los 20.1 m de profundidad.

- I. **Estrato Fill (0-0.6 m):** Conformado por material de relleno.
- II. **Estrato SP-SM (0.6-6.5 m):** Constituido de arena media (57%) y grava fina (34%) con limo (9%). El número de golpes en la prueba de penetración estándar es mayor que 50.
- III. **Estrato GP (6.5-8.0 m):** Formado por grava mal graduada. El número de golpes en la prueba de penetración estándar es mayor que 50.
- IV. **Estrato GP-GM (8.0 a 11.5 m):** Integrado por grava gruesa (49%) con arena (45%) y limos (6%). El número de golpes en la prueba de penetración estándar es mayor que 50.
- V. **Estrato SP y GP (11.5-16.0 m):** Conformado por arena mediana (53%) y grava fina (44%) con un pequeño porcentaje de finos. El número de golpes en la prueba de penetración estándar es mayor que 50.
- VI. **Estrato ARF (16.0-18.0 m):** Constituido por fragmentos de roca andesítica (ARF) con un Designación de Calidad de Roca (RQD, *Rock Quality Designation* por sus siglas en inglés) de 6%.
- VII. **Estrato SP-SM (18.0-20.1 m):** Formado por arena mal graduada con limo. El número de golpes en la prueba de penetración estándar es mayor que 50.

Para aplicar el modelo de transferencia de carga termo-mecánico descrito en el apartado 2.3, es necesario determinar algunas propiedades mecánicas de la pila, como el módulo de elasticidad (E), coeficiente de expansión térmica (α) y rigidez en la cabeza (K_h). Para el coeficiente de expansión térmica, se asignó un valor de $-1.43 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ de acuerdo con las NTCCADEE (2023). El módulo de elasticidad (17.5 GPa) se estimó con la expresión presentada en las NTCDCC (2023) para concretos de clase 1 con agregado grueso basáltico, considerando una resistencia a la compresión del concreto $f'c$ de 25 MPa:

$$E = 3500\sqrt{f'c} \quad (4.1)$$

La rigidez en la cabeza de la pila ($K_h = 1.95 \text{ GPa m}^{-1}$) se calculó con una ecuación inicialmente presentada por Gorbunov-Possadov y Serebrjanyi (1961) y retomada por Laloui y Rotta-Loria (2019) para el diseño de pilas de energía:

$$K_h = \frac{E_s \sqrt{B_{slab} L_{slab}}}{(1 - v_{suelo}^2) \rho_o} \quad (4.2)$$

donde E_s es el módulo de elasticidad del suelo igual a 89.94 MPa y v_{suelo} es la relación de Poisson del suelo igual a 0.323, ambos calculados como un promedio ponderado entre el espesor de cada estrato considerado y la profundidad que alcanza la pila (Braja M. Das, 2016). B_{slab} y L_{slab} son el ancho y la longitud de la losa en contacto con la cabeza de la pila que, de acuerdo con la Figura 4.3, son 8.74 y 28.73 m respectivamente. ρ_o es un factor de

desplazamiento que depende de la relación $\chi = L_{slab}/B_{slab}$ y se determina con base en la Figura 4.7:

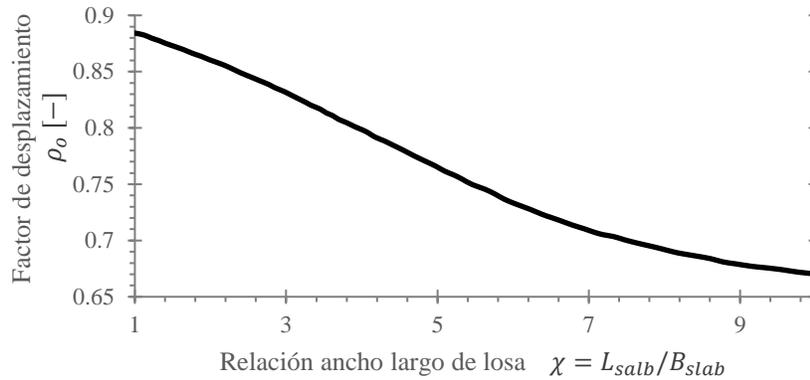


Figura 4.7 Relación entre la longitud/ancho y el factor de desplazamiento de una placa infinitamente rígida que descansa sobre un semiespacio elástico semi infinito (adaptado de Laloui y Rotta-Loria, 2019)

La relación de Poisson (ν) de cada estrato se determinó utilizando valores típicos para diferentes tipos de suelo reportados por Kulhawy y Mayne (1990), y valores calculados mediante la expresión propuesta por Trautmann y Kulhawy (1987). Para ello, se utilizaron ángulos de fricción interna correspondientes a suelos con características similares, según el caso de estudio presentado por Arizmendi (2021):

$$\nu_s \approx 0.1 + 0.3\phi_{rel} \quad (4.3)$$

donde ϕ_{rel} es el ángulo de fricción relativo que se calcula con el ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) como:

$$\phi_{rel} = \frac{(\phi - 25^\circ)}{(45^\circ - 25^\circ)} \quad ; \quad 0 \leq \phi_{rel} \leq 1 \quad (4.4)$$

Por otra parte, de acuerdo con la exploración geotécnica, donde el porcentaje de arenas y gravas en cada estrato es prácticamente uniforme, con un valor cercano al 50%, el módulo de elasticidad de cada estrato del suelo (E_s) se determinó como un promedio con valores típicos de gravas densas. Estos valores se calcularon considerando el número de golpes obtenido en el ensayo de penetración estándar (SPT, *Standard Penetration Test* por sus siglas en inglés) y siguiendo los lineamientos establecidos en *Engineering Properties of Soil and Rock (2014)*. El módulo estimado se calculó utilizando la ecuación 4.5, propuesta por Kulhawy y Mayne (1990), considerando un factor $\alpha = 10$ para arenas limpias normalmente consolidadas y un número de golpes $N_{60} = 52$, de acuerdo con los datos obtenidos *in situ*

mediante el SPT. La presión atmosférica se consideró como 77.84 kPa (Gobierno de México, 2024):

$$\frac{E_s}{P_a} = \alpha N_{60} \quad (4.5)$$

La Tabla 4.2 reúne las propiedades mecánicas de los estratos del suelo encontrados en el sitio de proyecto de la Residencia C73.

Tabla 4.2 Resumen de la estratigrafía del sitio y sus propiedades mecánicas

Estrato	Espesor (m)	q_s (kPa)	q_b (kPa)	a_s	a_b	E_m (MPa)	E (MPa)	ν
Fill	0.6	-	-	-	-	-	-	-
SP-SM	5.9	58.83	-	0.8	4.8	64.92	70.24	0.34
GP	1.5	196.40	-	0.8	4.8	163.18	105.00	0.25
GP-GM	3.5	125.98	-	0.8	4.8	58.35	75.00	0.30
SP y GP	4.5	130.50	1463.23	0.8	4.8	154.45	115.00	0.35
ARF	2.0	-	-	-	-	-	-	-
SP-SM	2.1	-	-	-	-	-	-	-

Nota: q_s es la resistencia unitaria de la interfaz suelo-pila (kPa), q_b es la resistencia unitaria en la punta de la pila (kPa), a_s y a_b son los coeficientes asignados de acuerdo con la granulometría del suelo, E_m es el módulo presiométrico de Menard (MPa), E el módulo de elasticidad (MPa) y ν la relación de Poisson. Para el diseño geotécnico se considera el segundo estrato SP-SM con un espesor de 6.5 m.

4.3.2 Cargas aplicadas

Para efectos prácticos, se consideró una carga mecánica total factorizada de 2,302.60 kN. El 70% de esta carga se supone como acción permanente y el 30% como acción variable, de acuerdo con Rotta-Loria *et al.* (2020). Tomando en cuenta las diferentes combinaciones de acciones utilizadas para el diseño de cimentaciones, propuestas en las NTCDC (2023), en este caso de estudio se emplea el primer tipo de combinación, que considera acciones permanentes (C_p) más acciones variables (C_v). En estas últimas, la acción más desfavorable se considera con intensidad máxima y el resto con intensidad instantánea para el estado límite de falla. Para el estado límite de servicio, las acciones se toman con su intensidad media. Los factores de carga (F_c) utilizados corresponden a edificaciones del Grupo B, destinado a viviendas, con valores de 1.3 para las acciones permanentes y 1.5 para las variables. En el estado límite de servicio, el factor de carga es unitario en todos los casos.

Aunque en este caso no se presentan temperaturas mayores a cero, se consideran las magnitudes obtenidas en el apartado 4.2.2 para cargas positivas (de calentamiento) para ilustrar los diferentes efectos de las cargas térmicas en las pilas de energía. Todas las cargas actuantes de diseño se determinaron multiplicando las acciones verticales por sus respectivos factores de carga, como se muestra en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Resumen de cargas termo-mecánicas de diseño utilizadas en el modelo de transferencia de cargas

Estado límite	Tipos de acciones	Acción	F_c	Intensidad		
				Máxima	Media	Instantánea
De falla	Permanente	Carga muerta C_p (kN)	1.3	1,611.82	-	-
		Carga viva C_{Vv} (kN)	1.5	690.78	345.39	345.39
	Variable	Carga de enfriamiento C_{Ve} (°C)	1.5	-25.64	-11	-11
		Carga de calentamiento C_{Vc} (°C)	1.5	25.64	11	11
De servicio	Permanente	Carga muerta C_p (kN)	1.0	1,611.82	-	-
		Carga viva C_{Vv} (kN)	1.0	690.78	345.39	345.39
	Variable	Carga de enfriamiento C_{Ve} (°C)	1.0	-25.64	-11	-11
		Carga de calentamiento C_{Vc} (°C)	1.0	25.64	11	11

De acuerdo con Arizmendi (2021), las combinaciones para analizar el estado límite de falla son:

- **Combinación 1.** Carga permanente, carga viva como acción variable más desfavorable y carga térmica como acción variable acompañante.
- **Combinación 2.** Carga permanente, carga de térmica de calentamiento como acción variable más desfavorable y carga viva como acción variable acompañante.
- **Combinación 3.** Carga permanente, carga térmica de enfriamiento como acción variable más desfavorable y carga viva como acción variable acompañante.

Para el estado límite de servicio se consideran las siguientes combinaciones:

- **Combinación 4.** Carga permanente con intensidad máxima, carga viva y carga térmica de calentamiento con intensidad media.
- **Combinación 5.** Carga permanente con intensidad máxima, carga viva y carga térmica de enfriamiento con intensidad media.

La Tabla 4.4 presenta las magnitudes de las diferentes combinaciones de carga termo-mecánicas para la evaluación del estado límite de falla y de servicio.

Tabla 4.4 Resumen de combinaciones de carga para la revisión de los estados límite de falla y de servicio

Estado límite	Combinación	C_p (kN)	Cv_v (kN)	Cv_c (°C)	Cv_e (°C)
De falla	1	2,095.37	1,036.17	16.50	-
	2	2,095.37	518.09	38.46	-
	3	2,095.37	518.09	-	-16.50
De servicio	4	1,611.82	345.39	11.00	-
	5	1,611.82	345.39	-	-11.00

Nota: C_p es la carga muerta (kN), Cv_v la carga viva (kN), Cv_c la carga variable de calentamiento (°C) y Cv_e la carga variable de enfriamiento (°C)

4.3.3 Estado límite de falla

El método de transferencia de carga termo-mecánico descrito en el apartado 2.3 se utilizó para analizar el comportamiento termo-mecánico mediante el código *EPiles*, desarrollado por Arizmendi (2021). En este análisis se consideró una capacidad de carga última de la pila de energía de 11,513 kN, de acuerdo con la exploración geotécnica, y una capacidad de carga reducida de 4,029.55 kN, aplicando un factor de resistencia igual a 0.35.

En la Figura 4.8 se presentan los desplazamientos verticales de la pila bajo diferentes combinaciones de carga. En general, los desplazamientos hacia arriba se consideran positivos, mientras que los desplazamientos hacia abajo son negativos. En las combinaciones 1 y 2, el eje nulo se determinó a los 6.64 m y 2.89 m, respectivamente. Es importante señalar que en la combinación 2, donde la temperatura es mayor, se observan menores desplazamientos sobre el eje nulo respecto a la combinación 1, con menor temperatura. Esto demuestra el efecto de la carga térmica en el comportamiento de la estructura, ya que los desplazamientos termo-mecánicos sobre o debajo del eje nulo tienden a reducirse o incrementar debido al fenómeno de expansión por calentamiento o contracción por enfriamiento. En consecuencia, al aplicar un incremento de temperatura (calentamiento), los desplazamientos termo-mecánicos se reducen sobre el eje nulo y aumentan por debajo de este, como se aprecia en la Figura 4.8a y 5.8b (combinación 1 y 2, respectivamente). En cambio, durante la etapa de enfriamiento, los desplazamientos aumentan sobre el eje nulo y disminuyen por debajo de este, como se observa en la Figura 4.8c (combinación 3).

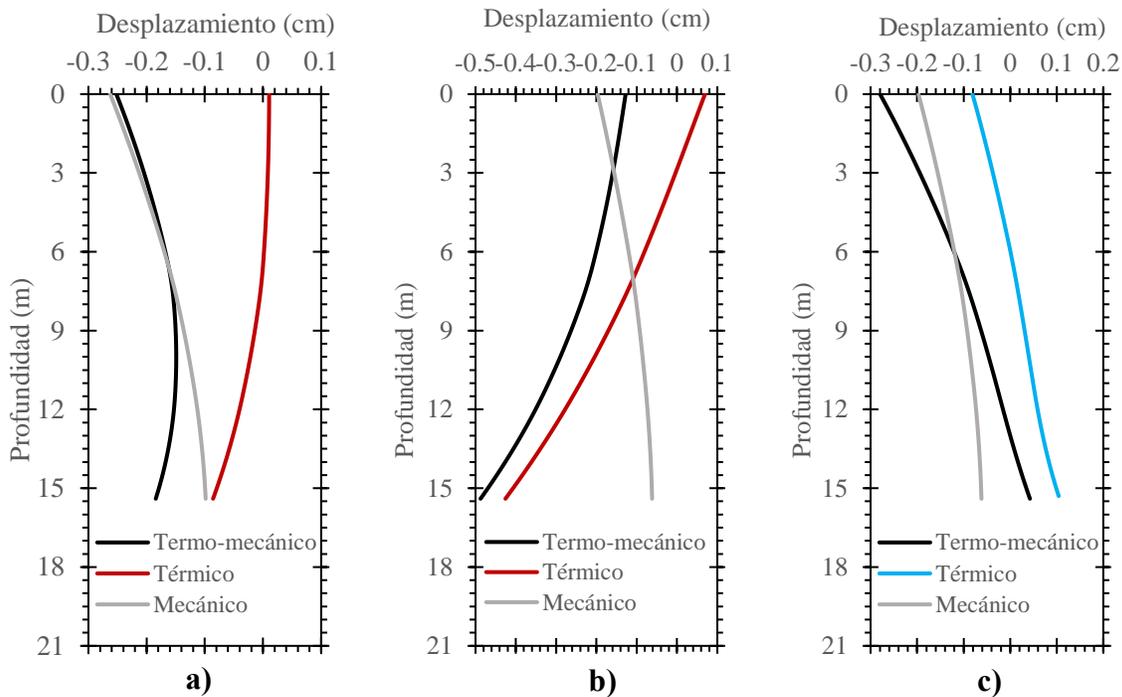


Figura 4.8 Desplazamiento vertical de la pila: a) Combinación 1, b) Combinación 2, c) Combinación 3

En la Figura 4.9 se muestra el perfil de carga axial de la pila para las distintas combinaciones de cargas termo-mecánicas. En la combinación 1, la carga termo-mecánica aumenta un 15.42% respecto a la carga mecánica, mientras que en la combinación 2 esta diferencia alcanza un 89.4% debido a la aplicación de un incremento de temperatura mayor. En la combinación 3, la carga termo-mecánica disminuye un 73.44% debido a la contracción de la pila durante el enfriamiento. En ningún caso se excede la capacidad de carga última de la pila.

La influencia de las restricciones en la punta y en la cabeza de la pila se observa al comparar las combinaciones 2 y 3, donde la carga axial resulta mayor cuando la pila se calienta que cuando se enfría. Esto se debe a que el incremento de temperatura provoca la expansión de la pila desde el eje nulo: la parte superior se desplaza hacia arriba y la inferior hacia abajo. La superestructura y el estrato de suelo rígido limitan este movimiento, lo que genera cargas axiales adicionales. En contraste, la disminución de temperatura induce la contracción de la pila hacia el eje nulo: la parte superior se desplaza hacia abajo y la inferior hacia arriba. En este caso, las restricciones en los extremos de la pila no limitan este movimiento, evitando la generación de cargas axiales adicionales.

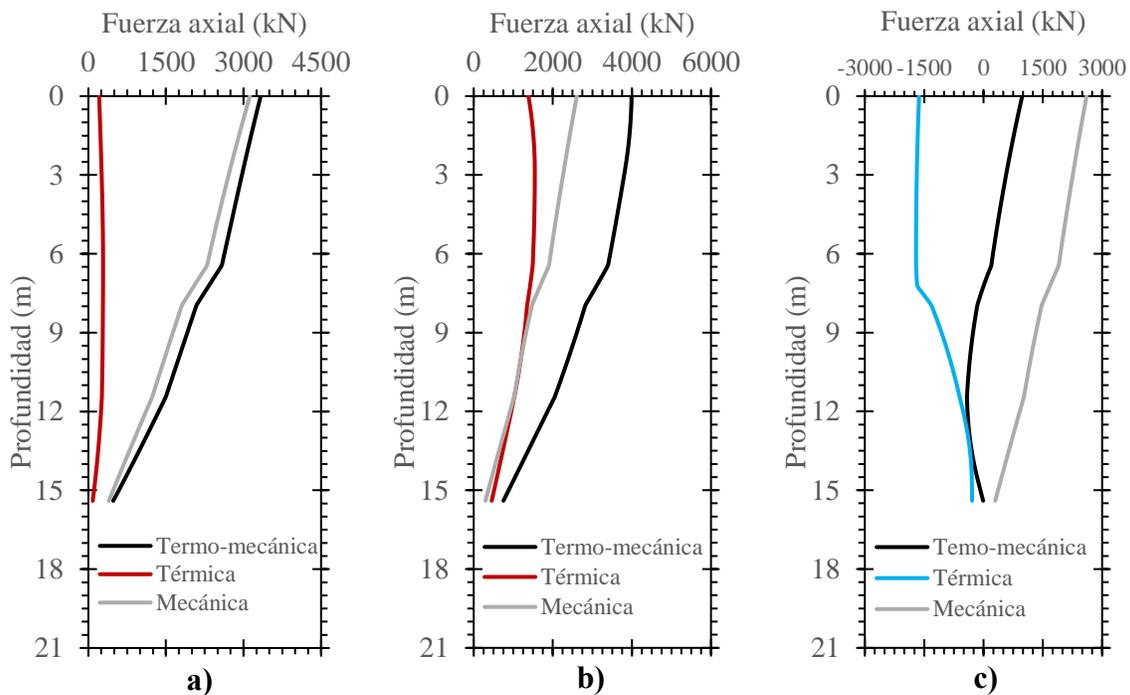


Figura 4.9 Distribución de carga axial con la profundidad: a) Combinación 1, b) Combinación 2 y c) Combinación 3

Para revisar el estado límite de falla, es necesario verificar que las cargas que actúan en la pila sean menores que la capacidad de carga reducida NTCDDC (2023). La Tabla 4.5 resume la revisión del estado límite de falla para cada combinación analizada.

Tabla 4.5 Revisión por estado límite de falla

Combinación	Capacidad de carga reducida (kN)		Carga actuante (kN)
1	4,029.55	>	3,332.72
2	4,029.55	>	3,991.80
3	4,029.55	>	-978.93

4.3.4 Estado límite de servicio

En la Figura 5.10 se muestran los desplazamientos para verificar el estado límite de servicio, en las combinaciones 4 y 5. En la combinación 4, la pila está sujeta a cargas de calentamiento, lo que provoca una expansión en sentidos opuestos a partir del eje nulo (ubicado a 9.14 m). Así, en la parte superior los efectos térmicos (hacia arriba) contrarrestan el desplazamiento mecánico (hacia abajo), mientras que en la parte inferior incrementan (llevan la misma dirección hacia abajo). En la combinación 5 ocurre lo contrario, la pila se contrae hacia el eje nulo (ubicado a 5.86 m) debido a las cargas térmicas de enfriamiento. En este caso, los desplazamientos por debajo del eje nulo se reducen significativamente, mientras que los movimientos térmicos en la zona superior se amplifican. Los desplazamientos termo-

mecánicos medidos en la cabeza de la pila para las combinaciones 4 y 5 son 0.11 y 0.18 cm, respectivamente.

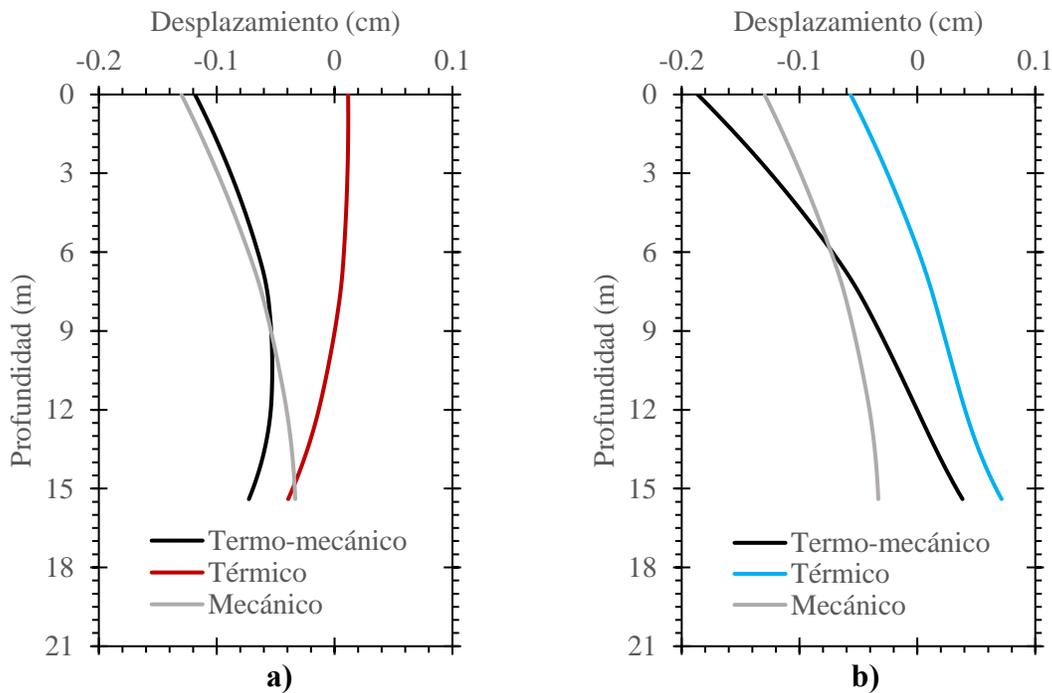


Figura 4.10 Desplazamiento vertical de la pila: a) Combinación 4 y b) Combinación 5

De acuerdo con las NTCDDCC(2023), la revisión por estado límite de servicio se realiza comparando los desplazamientos verticales de la pila con los límites permisibles establecidos para la zona geotécnica en la que se encuentra la estructura (Zona I de lomas para el caso de la Residencia C73). El caso más desfavorable ocurre cuando la pila se encuentra en enfriamiento, ya que en la parte superior los movimientos térmicos coinciden con la dirección del desplazamiento mecánico, lo que incrementa la respuesta general de la estructura. Sin embargo, en ningún caso se exceden los límites permisibles establecidos por la norma (ver Tabla 4.6), por lo que la pila se considera adecuada.

Tabla 4.6 Revisión por estado límite de servicio

Combinación	Desplazamiento vertical (cm)		Construcción aislada (cm)	Construcción colindante (cm)
4	0.11	<	5.00	2.5
5	0.18	<	5.00	2.50

4.4 Diseño estructural

A continuación, se verifica que el dimensionamiento y armado de la pila de energía sea capaz de soportar la carga axial transmitida por la superestructura. Para ello, se realizó un diagrama de interacción utilizando el software SAP2000 (v22.2) incorporando las características de los materiales y armado de la pila. El refuerzo estructural está compuesto por 16 barras longitudinales del número 12 y estribos del número 4 con una separación de 0.15 m (López-Acosta, Barba-Galdámez, *et al.*, 2022; López-Acosta *et al.*, 2024), ambos con un esfuerzo de fluencia de 4200 MPa. En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de interacción obtenido, donde se evalúa la influencia de la temperatura en la respuesta mecánica de la pila. En las combinaciones 1 y 2, correspondientes al calentamiento, los resultados muestran que dichas combinaciones no superan la resistencia de diseño de la estructura, lo que garantiza un comportamiento seguro. En la combinación 3, asociada al enfriamiento, se observa una reducción significativa de la carga debido a la contracción térmica de la pila. Este comportamiento también se encuentra dentro de los límites permisibles, asegurando que la estructura mantiene su integridad frente a las cargas termo-mecánicas previstas. Así se concluye que el armado de la pila es adecuado para soportar las cargas termo-mecánicas que se impondrán a lo largo de su vida útil.

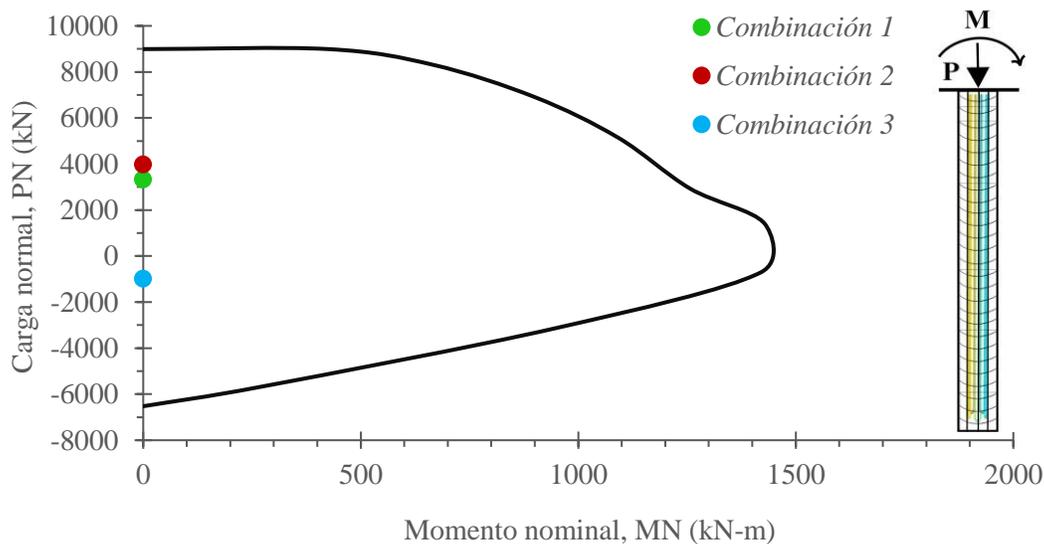


Figura 4.11 Diagrama de interacción de pila de energía de 0.8 m de diámetro obtenido con SAP2000

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis fue evaluar las metodologías analíticas para determinar la respuesta térmica en pilas de energía, midiendo su precisión y probando su aplicabilidad. Asimismo, se destacó su relevancia en el diseño termo-mecánico de pilas de energía mediante un caso de estudio. Para ello, después de una breve introducción dada, en el Capítulo 1 se describieron la energía geotérmica y los principales componentes de un sistema de intercambio de calor geotérmico a base de pilas de energía. Además, se analizó el comportamiento termo-mecánico y las consideraciones teóricas para el análisis térmico de estos elementos. Por último, se describió un esquema de diseño integral de pilas de energía, resaltando la conexión entre el diseño térmico y el diseño geotécnico con el cálculo de la variación de temperatura como parámetro de entrada en el diseño termo-mecánico.

En el Capítulo 2 se expusieron algunos métodos de análisis térmico para intercambiadores de calor geotérmicos, con énfasis en el Modelo de Fuente de Línea Finita (FLSM, *Finite Line Source Model* por sus siglas en inglés). Posteriormente, se detallaron los modelos analíticos implementados en el cálculo del cambio de temperatura representativo y las principales hipótesis del modelo de transferencia de carga utilizado en el diseño termo-mecánico de pilas de energía.

En el Capítulo 3 se llevó a cabo un análisis comparativo entre los datos obtenidos en diversas pruebas de campo, modelaciones numéricas (Brettmann y Amis, 2011; Murphy *et al.*, 2015;

Singh *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020) y los resultados generados mediante un código desarrollado en lenguaje Matlab®, basado en la metodología propuesta por Song *et al.* (2022). La evaluación se enfocó en analizar la influencia de distintos parámetros en la precisión de resultados, utilizando la metodología implementada en el código. Los aspectos analizados incluyen el diámetro de la pila, la longitud de pila, diámetro exterior de tubos de intercambio de calor, número de tubos, configuración del circuito primario, carga térmica, periodo de carga, temperatura de diseño, principio de superposición, criterio para la estimación de la resistencia térmica del concreto y la estratigrafía del suelo.

En el Capítulo 4 se abordó un caso de estudio denominado Residencia C73, ubicado en la Ciudad de México. Con el objetivo de ilustrar la aplicabilidad del método examinado en esta tesis, se desarrolló un proceso simplificado del diseño termo-mecánico de una de las pilas de energía instalada en la residencia. Para determinar el cambio de temperatura representativo, se utilizó el método implementado con el código *RTEMP* basado en un perfil real de cargas térmicas. Asimismo, se evaluó el comportamiento termo-mecánico mediante la implementación del programa denominado *EPiles*, que se basa en un modelo de transferencia de cargas termo-mecánico. Finalmente, se revisaron el estado límite de falla y el estado límite de servicio, de acuerdo con la metodología de diseño de pilas de energía propuesta por Arizmendi (2021) A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los análisis realizados:

Sobre el modelo analítico de Song et al. (2022)

- Se comprobó que el modelo refleja de manera coherente la respuesta térmica de las pilas de energía bajo diversas condiciones de carga térmica, periodos de prueba, diámetros de pila, diferentes tipos de configuración del circuito primario (espiral, U en serie, U en paralelo), cantidad de tubos y estratigrafía del suelo. Además, se demostró que el principio de superposición y el criterio para estimar la resistencia térmica del concreto implementados son adecuados y versátiles.
- Se demostró que el modelo es eficiente en términos de tiempo de cálculo y ahorro económico, con un nivel de precisión aceptable y resultados confiables. Por lo tanto, dicho método se presenta como una alternativa viable para sustituir la modelación numérica y simplificar el diseño termo-mecánico de pilas de energía en análisis desacoplados.
- Se comprobó que el cambio de temperatura representativo ofrece un mejor ajuste para describir la respuesta térmica de las pilas de energía.
- Se identificó que los resultados del modelo presentan un mejor ajuste con las mediciones realizadas en campo (Brettmann y Amis, 2011; Murphy *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2020) que, con lo establecido teóricamente en el modelo al analizar el número de tubos y configuración del circuito primario.
- Se identificó que las estimaciones del modelo presentan un sesgo significativo a corto plazo, el cual disminuye con el tiempo. Este sesgo se atribuye principalmente a la

diferencia de temperatura registrada por los sensores en las pruebas de campo. Al estar los sensores más cerca de la tubería, la temperatura medida es más alta respecto a los puntos más alejados. La reducción de esta diferencia se debe a las condiciones estacionarias del flujo de calor, que permiten alcanzar un punto de equilibrio térmico en el que la temperatura se estabiliza y no varía. Así, con el tiempo, las temperaturas registradas por los sensores se vuelven más uniformes y se ajustan mejor a las estimaciones del modelo.

Sobre el diseño termo-mecánico de pilas de energía

- Se concluyó que los resultados mediante código *RTEMP* son fundamentales como parámetro de entrada en el diseño termo-mecánico de pilas de energía, al derivar de las cargas térmicas involucradas en el diseño térmico. Esta herramienta representa la conexión entre los campos de diseño geotécnico-estructural y diseño térmico.
- Se demostró que el programa *RTEMP* simplifica significativamente el proceso del diseño termo-mecánico de pilas de energía en análisis desacoplados, mediante la integración con modelos de transferencia de cargas, como el implementado en el código *EPiles*. Ambos programas ofrecen una solución eficiente para abordar principalmente el diseño-geotécnico estructural.
- Se demostró que los códigos *RTEMP* y *EPiles* constituyen herramientas prácticas y confiables para el diseño geotécnico-estructural, ya que permiten evaluar los estados límite de falla y de servicio en pilas de energía bajo condiciones reales y específicas, como las del caso de estudio en la Ciudad de México.

Sobre el diseño geotécnico-estructural

- Se determinaron los principales efectos de las cargas térmicas en el comportamiento termo-mecánico de una pila de energía instalada en una residencia ubicada en la Ciudad de México. Estos efectos incluyen la influencia de las restricciones impuestas por la superestructura y el suelo, que pueden generar fuerzas axiales y desplazamientos adicionales en la estructura.
- Se comprobó que las condiciones de equilibrio inducidas por los cambios de temperatura, en la pila de energía del caso de estudio, previenen mecanismos de colapso ante el estado límite de falla.
- Se evidenció el efecto de la expansión y contracción generado por el incremento/decremento de temperatura en las pilas de energía. En la sección superior al eje nulo, el incremento de temperatura disminuye los desplazamientos termo-mecánicos, ya que los desplazamientos térmicos llevan una dirección opuesta a los desplazamientos generados por la carga mecánica. En cambio, una disminución de temperatura incrementa la magnitud de los desplazamientos termo-mecánicos, ya que los desplazamientos térmicos llevan la misma dirección que los generados por la

carga mecánica. Ninguno de estos efectos superó el estado límite de servicio en la pila de energía del caso de estudio en la Ciudad de México.

- Se verificó que las fuerzas de compresión y tensión, generadas por las cargas térmicas, no exceden la resistencia de diseño de la pila de energía en el caso de estudio de la Ciudad de México.

5.2 Recomendaciones

El modelo analítico empleado para calcular el cambio de temperatura representativo en pilas de energía, implementado en el código *RTEMP*, se evaluó principalmente para analizar el comportamiento de los resultados, evaluar su precisión y verificar su aplicabilidad e idoneidad en para el diseño termo-mecánico de pilas de energía, considerando las principales hipótesis bajo las cuales fue desarrollado. A partir de la evaluación realizada en esta tesis, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras aplicaciones y/o investigaciones:

- El modelo evaluado en esta tesis se presenta como una herramienta ideal para complementar métodos desacoplados de análisis de pilas de energía, que consideran un cambio de temperatura en todo el volumen del elemento. Se recomienda que el cambio de temperatura representativo sea empleado como base para el diseño de las pilas (Abdelaziz y Ozudogru, 2016b; Laloui y Rotta-Loria, 2019; Song *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2020; Zeng *et al.*, 2002). En la actualidad existen modelos de transferencia de cargas termo-mecánicos más avanzados que consideran los acoplados del suelo y la interfaz suelo-pila (Feng *et al.*, 2024), en los cuales el código *RTEMP* es aplicable.
- Se recomienda aplicar la metodología evaluada en análisis a largo plazo, preferentemente en periodos superiores a 50 horas. En análisis a corto plazo (menores a 50 horas), esta metodología puede ser usada para obtener resultados preliminares en el diseño termo-mecánico de pilas de energía.
- Se sugiere explorar diferentes técnicas para representar las propiedades térmicas de los distintos estratos al considerar un suelo homogéneo, utilizando enfoques como el promedio general o el promedio ponderado, con el fin de mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados.
- Estudiar otros criterios para estimar la resistencia térmica del concreto y determinar una expresión que proporcione resultados más precisos. Esto permitiría superar las limitaciones actuales relacionadas con el diámetro de la pila/tubos y la cantidad de tubos del criterio utilizado, haciendo que método sea más versátil.
- Implementar un modelo de respuesta térmica en la interfaz suelo-pila que considere la estratigrafía real del suelo. Esto permitiría superar las limitaciones asociadas a la consideración de un suelo homogéneo y mejoraría significativamente la precisión del método.
- Analizar, mediante modelación numérica, la influencia de factores como el diámetro de pila, longitud de pila, configuración del circuito primario, número de tubos, diámetro de tubos, tipo de carga térmica, periodo de carga y propiedades térmicas en

el cambio de temperatura representativo. Este enfoque holístico facilitaría la comprensión del impacto de diferentes parámetros y las posibles limitaciones del método a corto y largo plazo. Asimismo, permitirá determinar la relevancia y precisión del modelo en el diseño termo-mecánico de pilas de energía que operen a corto plazo.

REFERENCIAS

- Abbs, A. F., Bell, R. A., Khorshid, M. S., y Jewell, R. J. (1988). Evaluation of pile friction from conductor load test. En R. J. Jewell & D. C. Andrews (Eds.), *International Conference on Calcareous Sediments*.
- Abdelaziz, S. (2013). *Deep Energy Foundations: Geotechnical Challenges and Design Considerations*.
- Abdelaziz, S., y Ozudogru, T. (2016a). Non-uniform thermal strains and stresses in energy piles. *Environmental Geotechnics*, 3(4), 237–252. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00032>
- Abdelaziz, S., y Ozudogru, T. (2016b). Selection of the design temperature change for energy piles. *Applied Thermal Engineering*, 107, 1036–1045. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.067>
- Abuel-Naga, H., Raouf, M. I. N., Raouf, A. M. I., y Nasser, A. G. (2015). Energy piles: Current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2(4), 195–210. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00019>
- Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., y Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Geotechnique*, 62(6), 503–519. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.116>
- American Society of Heating, R. and A.-C. E. (ASHRAE). (2021). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*.
- Andraca-Gutiérrez, F. H., y Rodríguez-Marian, J. R. (2012). *Modelado inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración* [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1854/Tesis.pdf?sequence=1>
- Arenas Moreno, M. (2023). *Evaluación analítica del comportamiento térmico de las pilas de energía* [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arizmendi, K. (2021). *Curvas de transferencia de carga para el análisis y diseño numérico de pilas de energía*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. (2019). *La bomba de calor. Fundamentos, tecnología y casos prácticos*. (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, Ed.; Tercera Edición). Pacprint Publicidad.
- Asociación de fabricantes de equipos de climatización, A. (2023). *¿Qué es una bomba de calor?* Todo sobre la bomba de calor. <https://www.bombadecolor.org/>

- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2012). Guía técnica. Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. En *Calificación de Eficiencia Energética de Edificios*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Barba Galdámez, D. F. (2018). *Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas, con énfasis en pilas de energía*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., y Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.).
- Bourne-Webb, P., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., y Loveridge, F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 65, pp. 402–419). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.046>
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., y Soga, K. (2013). A framework for understanding energy pile behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 166(2), 170–177. <https://doi.org/10.1680/geng.10.00098>
- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., y Payne, P. (2009). Energy pile test at lambeth college, London: Geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique*, 59(3), 237–248. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>
- Bourne-Webb, P. J., y Bodas Freitas, T. M. (2020). Thermally-activated piles and pile groups under monotonic and cyclic thermal loading—A review. *Renewable Energy*, 147, 2572–2581. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.025>
- Braja M. Das. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (8th ed.). Timothy L. Anderson.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.
- Brettmann, T., y Amis, T. (2011). *Thermal Conductivity Evaluation of a Pile Group Using Geothermal Energy Piles*. 499–508. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)52](https://doi.org/10.1061/41165(397)52)
- Carslaw, H., y Jaeger, J. (1959). *Conduction of Heat in Solids*.
- Chan, S. F., y Hanna, T. H. (1980). Repeated loading on single piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 106(2), 171–188.
- Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE. (2015). *Guide A: Environmental Design*. CIBSE.
- Chen, D., y McCartney, J. S. (2017). Parameters for Load Transfer Analysis of Energy Piles in Uniform Nonplastic Soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000873](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000873)

- Claesson, J., y Eskilson, P. (1988). *Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal Analyses and Dimensioning Rules* (Vol. 13, Número 6).
- Coyle, H., y Reese, L. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. *J. Soil Mech. and Found. Div.*, 92(2), 1–26.
- Diao, N., Li, Q., y Fang, Z. (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(12), 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009>
- Engineering Properties of Soil and Rock*. (2014). <https://iowadot.gov/design/dmanual/200E-01.pdf>
- Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*.
- Feng, S., Fang, J., Zhao, Y., Zhang, Z., y Wang, Y. (2024). Thermomechanical Analysis of Energy Piles Using a Load-transfer Approach Considering Soil Coupling Effects. *Computers and Geotechnics*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106147>
- Frank, R., y Zhao, S. (1982). Estimation par les parametres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussees*, 119, 17–24.
- García Gutiérrez, A., Barragán Reyes, R. M., y Arellano Gómez, V. M. (2008). *Investigación y desarrollo tecnológico sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica*.
- García Gutiérrez, A., y Martínez Estrella, I. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Geotermia*, 25(2), 58–68.
- Gobierno de México. (2024). *Servicio Meteorológico Nacional*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Gorbunov-Possadov, M. I., y Serebrjanyi, R. V. (1961). Design of Structures on Elastic Foundations. *5th Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 643–648. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Hu, P., Zha, J., Lei, F., Zhu, N., y Wu, T. (2014). A composite cylindrical model and its application in analysis of thermal response and performance for energy pile. *Energy and Buildings*, 84, 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.046>
- Ingersoll, L., Zobel, O., y Ingersoll, J. (1955). Heat Conduction. With engineering, geological, and other applications. *The Journal of Geology*, 63(2), 196.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). *Renewable energy highlights Renewable electricity generation by energy source*.

- <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/-/media/584D515B62FC4D81992CD56B6242262D.ashx>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). *Renewable energy highlights Renewable electricity generation by energy source*. <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/-/media/584D515B62FC4D81992CD56B6242262D.ashx>
- Knellwolf, C., Peron, H., y Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890–902. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000513](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000513)
- Kulhawy, F. H., y Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation*. https://www.geoengineer.org/storage/publication/20489/publication_file/2745/EL-6800.pdf
- Laloui, L., Nuth, M., y Vulliet, L. (2003). *Experimental and Numerical Investigations of the Behaviour of a Heat Exchanger Pile*.
- Laloui, L., y Rotta-Loria, A. F. (2019). *Analysis and Design of Energy Geostructures. Theoretical Essentials and Practical Application*. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04166-6>
- Lamarche, L., y Beauchamp, B. (2007). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.003>
- Lazzari, S., Priarone, A., y Zanchini, E. (2010). Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement. *Energy*, 35(12), 4966–4974. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.028>
- Li, M., y Lai, A. C. K. (2012). Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers. *Applied Energy*, 96, 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.084>
- Li, M., Zhu, K., y Fang, Z. (2016). Analytical methods for thermal analysis of vertical ground heat exchangers. En *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* (pp. 158–183). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00006-6>
- López-Acosta, N. P., Barba-Galdámez, D. F., y Arenas-Moreno, M. (2024). Case Study - Feasibility of energy piles in a cooling-dominated climate in Mexico. *Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-99-9722-0_27

- López-Acosta, N. P., Barba-Galdámez, D. F., y Rivera-Martínez, A. M. (2022). First Thermal Response Test (TRT) for energy geo-structure applications in Mexico. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://www.issmge.org/publications/publication/first-thermal-response-test-trt-for-energy-geo-structure-applications-in-mexico>
- López-Acosta, N. P., Rivera-Martínez, A. M., y Barba-Galdámez, D. F. (2022). Construcción y ensayo de la primera pila de energía de México. En López-Acosta N.P y Martínez-Hernández E. (Eds.), *Memorias del 5to Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas. Avances recientes en cimentaciones profundas* (pp. 71–78).
- Loveridge, F., y Powrie, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57, 554–564. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.060>
- Makasis, N., Narsilio, G. A., y Bidarmaghz, A. (2018). A machine learning approach to energy pile design. *Computers and Geotechnics*, 97, 189–203. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.01.011>
- Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J., y Fang, Z. (2010). A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13–14), 2593–2601. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.001>
- Mohamad, Z., Fardoun, F., y Meftah, F. (2021). A review on energy piles design, evaluation, and optimization. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 292). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125802>
- Murphy, K. D., McCartney, J. S., y Henry, K. S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), 179–195. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0298-4>
- Nauroy, J. F., Bruy, F., y LeTirant, p. (1985). Static and cyclic load tests on a drilled and grouted pile in calcareous sand. *Proc. Beth. of Offshore Structures*, 577–587.
- Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones. (2023). En *NTCDCC*.
- Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*. (2023). <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>.
- O’Neal, D. (1998). Development of an equivalent diameter expression for vertical U-Tubes used in ground-coupled heat pumps. *ASHRAE Transactions*, 104, 347–355.

- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Philippe, M., Bernier, M., y Marchio, D. (2009). Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes. *Geothermics*, 38(4), 407–413. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.07.002>
- Poulos, H. G. (1988). The mechanics of calcareous sediments. *Jaeger Memorial Lecture*.
- Prol Ledesma, R. M. (2023). Introducción a la Geotermia. En [MOOC] Coursera. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.coursera.org/learn/geotermia/home/info>
- Romero Pereira, M., y Higinio Pulido, A. M. (2021). Energías renovables no convencionales para satisfacer la demanda energética: análisis de tendencias entre 1990 y 2018. *Revista EIA*, 18(36), 1–21. <https://doi.org/10.24050/reia>
- Rotta-Loria, A. F., Bocco, M., Garbellini, C., Muttoni, A., y Laloui, L. (2020). The role of thermal loads in the performance-based design of energy piles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100153>
- Rotta-Loria, A. F., y Laloui, L. (2018). Thermo-mechanical Schemes for Energy Piles. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Energy Geotechnics*, 218–225. <http://www.springer.com/series/8069>
- Sarbu, I., y Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. En *Energy and Buildings* (Vol. 70, pp. 441–454). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Singh, R. M., Bouazza, A., y Wang, B. (2015). Near-field ground thermal response to heating of a geothermal energy pile: Observations from a field test. *Soils and Foundations*, 55(6), 1412–1426. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.10.007>
- Song, H., Pei, H., Zhou, C., Zou, D., y Cui, C. (2022). Calculation of the representative temperature change for the thermomechanical design of energy piles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100264>
- Trautmann, C. H., y Kulhawy, F. H. (1987). *CUFAD- A Computer Program for Compression and Uplift Foundation Analysis and Design*.
- Wu, D., Liu, H., Kong, G., y Rotta Loria, A. F. (2020). Thermo-mechanical behavior of a full-scale energy pile equipped with a spiral pipe configuration. *Canadian Geotechnical Journal*.

- Zeng, H. Y., Diao, N. R., y Fang, Z. H. (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558–567. <https://doi.org/10.1002/htj.10057>
- Zhang, W., Yang, H., Lu, L., Cui, P., y Fang, Z. (2014). The research on ring-coil heat transfer models of pile foundation ground heat exchangers in the case of groundwater seepage. *Energy and Buildings*, 71, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.016>

ANEXO I. CALIBRACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO PARA EL CÁLCULO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA REPRESENTATIVO PARA EL DISEÑO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA

El método para calcular el cambio de temperatura representativo en pilas de energía, descrito en el apartado 2.2, se programó en un código desarrollado en lenguaje Matlab®, denominado *RTEMP*. Este código fue calibrado utilizando los resultados obtenidos de diversas pruebas de modelación numérica, bajo distintas condiciones de carga térmica sinusoidal (balanceada, no balanceada e invertidas), diámetro de pila y cantidad de tubos de intercambio de calor. A continuación, se presentan las pruebas realizadas para la calibración del código.

I.1 Modelación numérica en ABAQUS

Para validar el modelo analítico, Song *et al.* (2022) realizaron una serie de modelaciones numéricas de pilas de energía, cuyo procedimiento fue contrastado con resultados experimentales *in-situ* obtenidos en el Instituto Federal de Tecnología de Suiza en Lausana (Laloui *et al.*, 2003). Los resultados de estas modelaciones fueron utilizados para calibrar el código implementado en esta tesis y verificar el comportamiento del modelo analítico.

I.1.1 Geometría, propiedades y cargas térmicas

En la modelación numérica se utilizó una pila de concreto de 10 m de longitud y un diámetro de 1 m. Fue simulada con tuberías en U de 0.032 m de diámetro. En la Tabla I.1 se resumen las propiedades térmicas, de la pila y el suelo, utilizadas para la calibración del código.

Tabla I.1 Propiedades térmicas utilizadas para la calibración del código en el método de Song *et al.* (2022)

Parámetro	λ		C_p		ρ		D_T	
	$(W m^{-1} K^{-1})$		$(J kg^{-1} K^{-1})$		$(kg m^{-3})$		$(m^2 s^{-1})$	
Material	Suelo	Pila	Suelo	Pila	Suelo	Pila	Suelo	Pila
Valor	1.5	2.0	1000	1500	-2500	1910	6.9808E-07	6E-07

Nota: λ es la conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$), C_p capacidad calorífica específica ($J kg^{-1} K^{-1}$), ρ la densidad ($kg m^{-3}$) y D_T difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$).

La pila de energía fue analizada con tres cargas térmicas base, descritas por una ecuación sinusoidal en el periodo de un año:

$$Q_{Bal} = 80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12}\right) \quad (I.1)$$

$$Q_{2Real} = \frac{2}{4}80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right) + \frac{1}{4}80 \cdot \left|\text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right)\right| \quad (I.2)$$

$$Q_{3Real} = \frac{2}{4}80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right) - \frac{1}{4}80 \cdot \left|\text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right)\right| \quad (I.3)$$

Durante la verificación de las expresiones del modelo analítico para obtener el cambio de temperatura representativo, se identificaron discrepancias entre los resultados del código y el modelado numérico. Al analizar diferentes factores que pudieron provocar esta diferencia, se determinó que el origen radicaba en un error en las expresiones de carga térmica propuestas por Song *et al.* (2022). La Figura I.1 presenta las cargas originales Q , con marcador cuadrado, y las cargas corregidas Q_{Real} , con marcador triangular. Cabe mencionar que la carga balanceada Q_{Bal} no requirió modificaciones. Con base en estas cargas corregidas, se determinaron las expresiones para un segundo conjunto de cargas invertidas aplicadas en la pila (ecuaciones I.4, I.5 y I.6). La Figura I.2 reúne todas las cargas térmicas aplicadas en la pila de energía.

$$Q_{Bal\ Invertida} = -80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12}\right) \tag{I.4}$$

$$Q_{2Real\ Invertida} = -\frac{2}{4}80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right) - \frac{1}{4}80 \cdot \left|\text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right)\right| \tag{I.5}$$

$$Q_{3Real\ Invertida} = -\frac{2}{4}80 \cdot \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right) + \frac{1}{4}80 \cdot \left|\text{Sen}\left(\frac{2\pi}{12} \cdot t\right)\right| \tag{I.6}$$

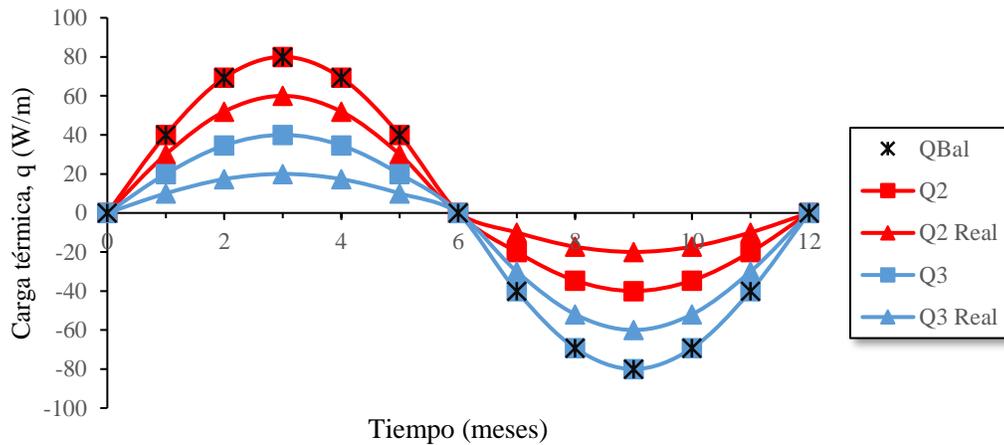


Figura I.1 Cargas térmicas no balanceadas (sinusoidales) a las que se encuentra sometida la pila. Las curvas rojas presentan mayor calefacción, mientras que las azules mayor refrigeración

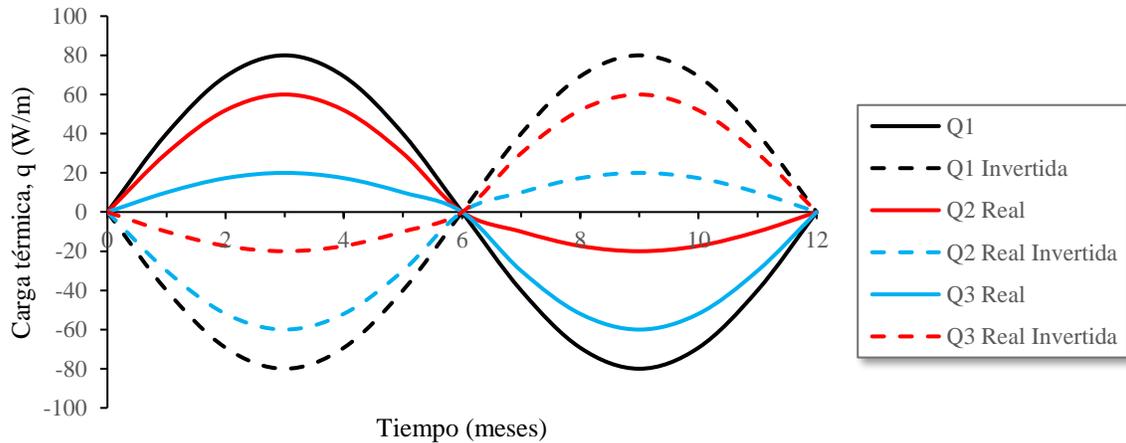


Figura I.2 Cargas balanceadas y no balanceadas (sinusoidales) normales e invertidas. Las curvas azules representan mayor refrigeración, las rojas mayor calefacción y las negras representan la misma magnitud de calefacción como de refrigeración.

I.2 Resultados de calibración

A continuación, se presentan los resultados de la calibración del código en pruebas bajo diferentes condiciones de operación. Primero, se presentan los resultados obtenidos con diferentes cargas térmicas sinusoidales: balanceadas (Q_{Bal}), no balanceadas (Q_{2Real} y Q_{3Real}), balanceadas y no balanceadas invertidas ($Q_{Bal Invertida}$, $Q_{2Real Invertida}$ y $Q_{3Real Invertida}$). Después, se presentan resultados con diferentes diámetros de pila ($D = 0.5, 0.7$ y $1 m$), manteniendo un mismo número de tubos de intercambio de calor en su interior ($N = 2$ tubos) y la misma carga térmica balanceada (Q_{Bal}). Por último, se analizan los resultados obtenidos al variar la cantidad de tubos de intercambio de calor ($N = 2, 4, 6$ y 8 tubos), manteniendo constante la carga balanceada (Q_{Bal}) y el diámetro de pila $D = 1 m$.

I.2.1 Diferentes cargas térmicas sinusoidales

La Figura I.3 presenta los resultados del cambio de temperatura bajo diferentes cargas sinusoidales. Se observa que, en todas las pruebas, el código muestra un comportamiento muy similar a los resultados obtenidos mediante el modelado numérico realizado por (Song *et al.*, 2022). En particular, los resultados del código en la prueba con carga balanceada (Figura I.3a y Figura I.3b) son los que más se aproximan a los resultados del modelado, ya que la expresión de la carga térmica coincide exactamente con la reportada por Song *et al.* (2022). Sin embargo, en las pruebas con cargas no balanceadas (Figura I.3c, Figura I.3e, Figura I.3d y Figura I.3f) los resultados presentan una diferencia notable. Lo anterior se debe a que la carga térmica corregida no coincide exactamente con la utilizada por los autores en el modelado numérico, cuya expresión se desconoce. Además, el cambio en las propiedades térmicas de los materiales puede cambiar los resultados, evidenciando este tipo de diferencias, tal como se concluyó en la calibración respecto al número de tubos de intercambio de calor, que se describe más adelante. No obstante, los resultados muestran un mejor ajuste al aplicar las cargas térmicas corregidas, previamente descritas. Con estos resultados, se confirma que el código mantiene su validez al capturar la evolución temporal de la respuesta térmica de la pila, incluso bajo la aplicación de diferentes tipos de carga térmica, logrando resultados aceptables.

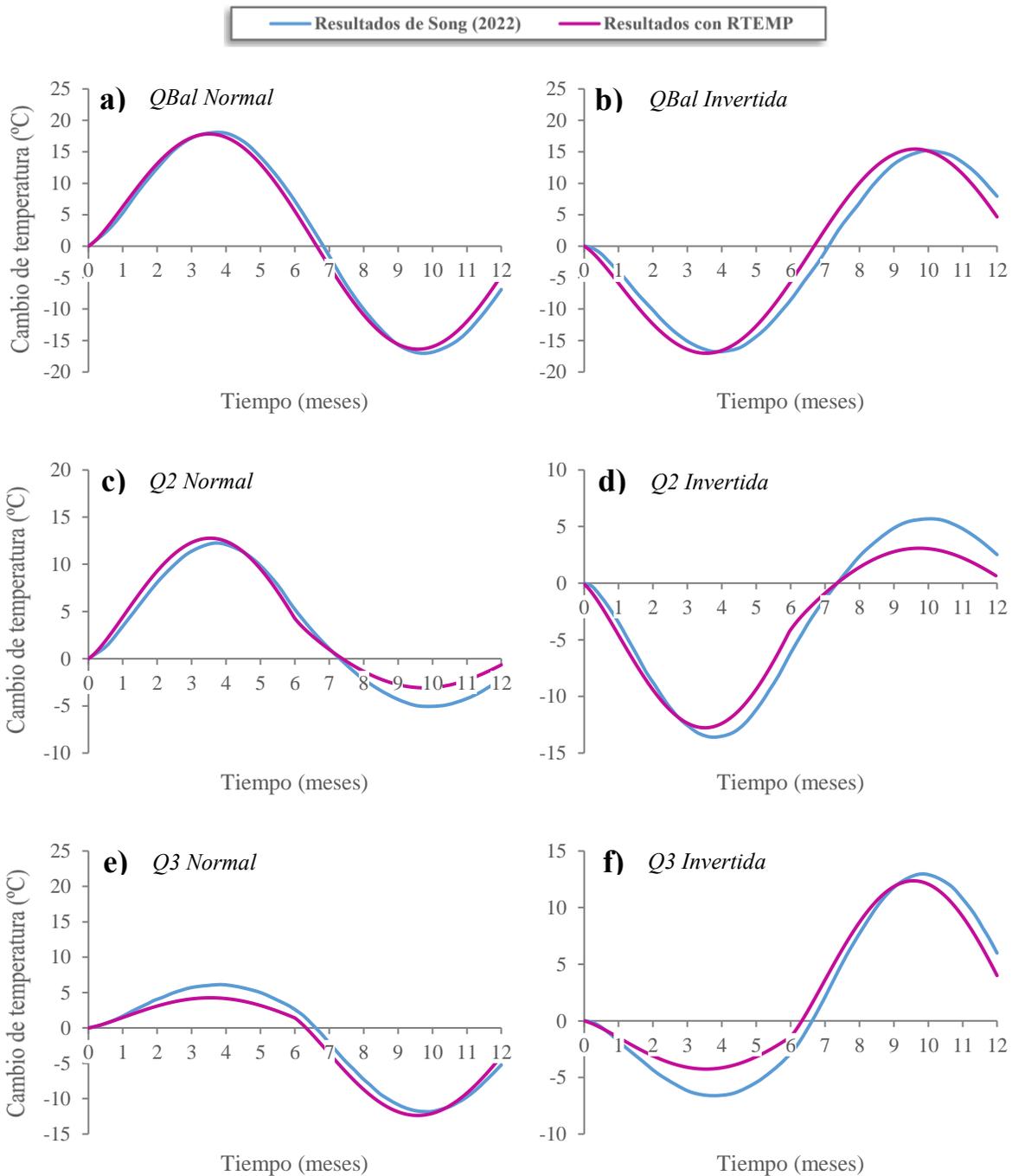


Figura I.3 Resultados de calibración del código *RTEMP* para diferentes cargas sinusoidales. De lado izquierdo se encuentran los resultados bajo cargas normales, de lado derecho aquellos bajo cargas invertidas, a) y b) bajo carga balanceada Q_{Bal} , c) y d) bajo carga no balanceada $Q_{2\ Real}$, e) y f) bajo carga no balanceada $Q_{3\ Real}$

I.2.2 Diferente diámetro de pila

La Figura I.4 muestra los resultados del cambio de temperatura representativo en pilas de energía con diferente diámetro. Se observa que el código mantiene una correspondencia con las estimaciones del modelo numérico, reflejando la influencia del cambio en el diámetro de la pila. Según lo establecido en el apartado 2.2.1, un aumento en el diámetro de la pila reduce el cambio de temperatura, mientras que una disminución del diámetro genera un mayor cambio de temperatura. Sin embargo, los resultados de *RTEMP* mantienen un desplazamiento horizontal respecto a los resultados de Song *et al.* (2022), aunque esto no afecta la magnitud del cambio de temperatura. Al analizar diversos factores que podrían haber causado este desplazamiento, se identificó la causa mediante un análisis de sensibilidad de las propiedades térmicas de los materiales. En este análisis se concluyó que los diferentes valores de las propiedades térmicas tienen una influencia importante en la magnitud del cambio de temperatura, lo que puede generar una respuesta anticipada o tardía (desplazamiento en el eje horizontal del tiempo). Por lo que la diferencia entre los resultados puede deberse a que los autores cambiaron las propiedades térmicas de los materiales o no usaron los valores reportados (Tabla I.1), tal como sucedió con las cargas térmicas.

En la Figura I.5 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad, sobre las propiedades térmicas, que muestran un mejor ajuste al modelo numérico. Este análisis evidencia un menor desplazamiento horizontal y una variación pequeña en la magnitud del cambio de temperatura. Se aprecia que el código mantiene un buen ajuste en la respuesta térmica de la pila ante el cambio de diámetro. Estos resultados fueron obtenidos utilizando las mismas propiedades térmicas presentadas en la Tabla I.1, cambiando únicamente la capacidad calorífica específica del suelo a un valor igual a $2,500 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

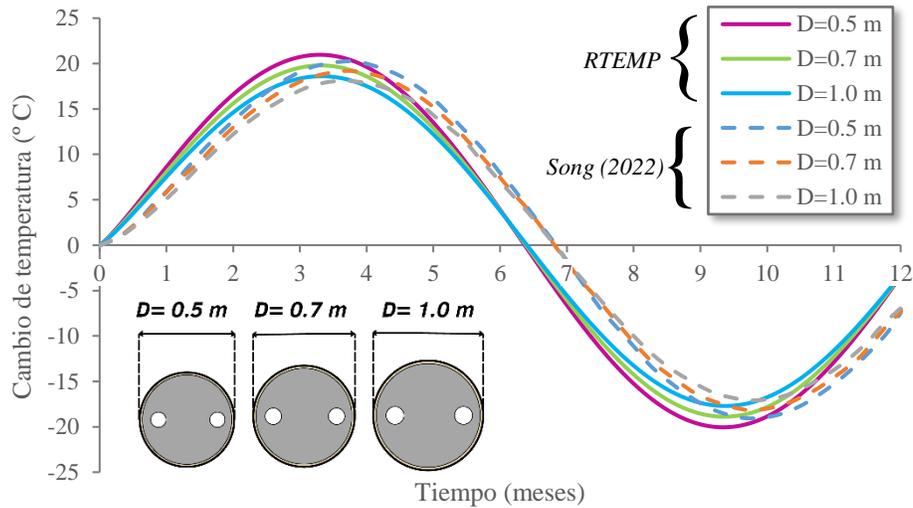


Figura I.4 Resultados de calibración del código *RTEMP* para diferentes diámetros de pila

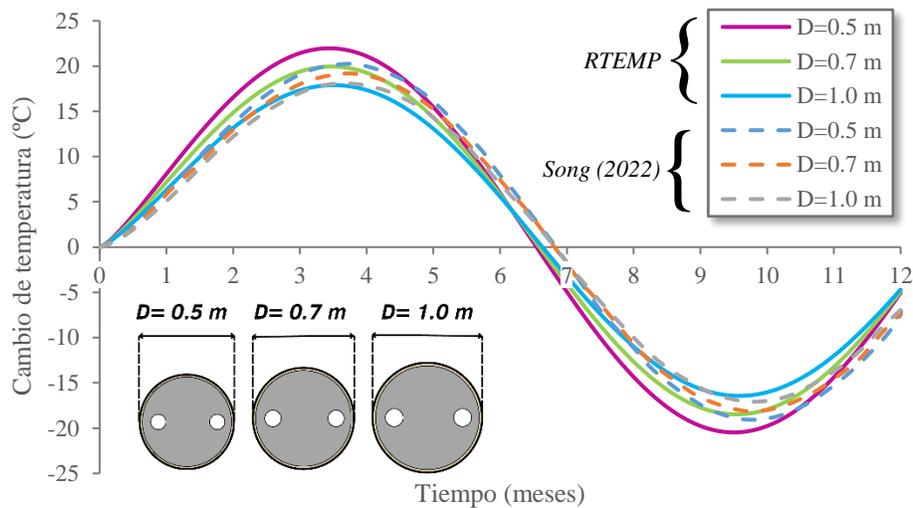


Figura I.5 Resultados del análisis de sensibilidad del código *RTEMP* sobre la influencia de un cambio del diámetro de pila en el cambio de temperatura representativo

I.2.3 Diferente cantidad de tubos de intercambio de calor

La Figura I.6 presenta los resultados del cambio de temperatura representativo en pilas de energía con 1 m de diámetro y diferente número de tubos de intercambio de calor. Se observa una diferencia significativa entre los resultados del código y el modelado numérico. Este comportamiento es contrario a lo presentado en el apartado 2.2.1, donde un mayor número de tubos debería generar un mayor cambio de temperatura (el código estima un menor cambio

de temperatura), y un menor número de tubos genera un menor cambio de temperatura (el código estima un mayor cambio de temperatura). Asimismo, se aprecia que la influencia del número de tubos en el cambio de temperatura no es tan significativa en el código como lo es en el modelado numérico.

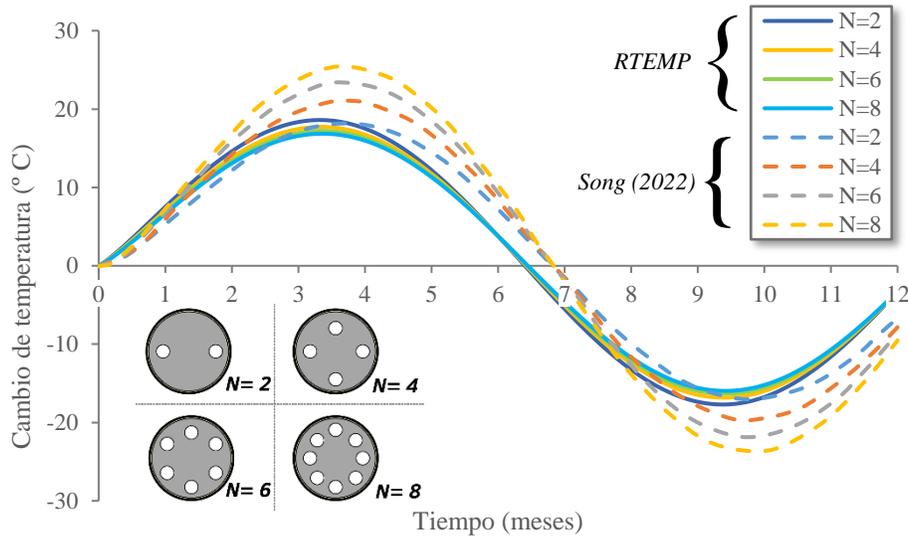


Figura I.6 Resultados de calibración del código para diferente cantidad de tubos de intercambio de calor (adaptado de Song *et al.*, 2022)

Para identificar la causa de estas discrepancias, se analizaron diversos factores considerando las conclusiones obtenidas en los resultados de calibración anteriores. Asimismo, se verificaron las ecuaciones presentadas por Song *et al.*, 2022 para el cálculo del cambio de temperatura en el concreto de la pila. Se utilizó una carga unitaria q , un diámetro de pila constante igual a 1 m y un diámetro exterior de tubería igual a 32 mm en las ecuaciones evaluadas, como se presentan a continuación:

$$\Delta T_{average} = \frac{r_{eq} + r_{pila}}{r_{eq} - r_{pila}} \cdot \frac{q * \ln(r_{pila}/r_{eq})}{4\pi\lambda_{concrete}} \quad (I.7)$$

$$R_{concrete} = \frac{-\ln(\xi)}{2\pi\lambda_{concrete}} \quad ; \quad \xi = \frac{r_{eq}}{r_{pila}} \quad (I.8)$$

$$\Delta T_{average} = \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \cdot \frac{q * \ln(\xi)}{4\pi\lambda_{concrete}} \quad (I.9)$$

donde $\lambda_{concrete}$ es la conductividad térmica del concreto y r_{eq} se determina como con el diámetro del tubo de intercambio de calor (D_{tubo}):

$$r_{eq} = \frac{\sqrt{n}D}{2} \quad (I.10)$$

La Tabla I.2 muestra los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones utilizadas para calcular el cambio de temperatura en el concreto de la pila. Se observa que, a medida que aumenta el número de tubos, la relación r_{eq}/r_{pila} se incrementa, lo que reduce la resistencia térmica del concreto. Además, el cambio de temperatura se hace mayor cuando se suma el efecto de la temperatura en la interfaz suelo-pila. En cambio, cuando disminuye la cantidad de tubos, la resistencia térmica del concreto aumenta y el cambio de temperatura disminuye. Estos resultados demuestran que las ecuaciones son correctas y que no presentan problemas en su aplicación.

Tabla I.2 Verificación de ecuaciones del cambio de temperatura promedio y resistencia térmica del concreto para diferente número de tubos de intercambio de calor. La tendencia a ser mayor está representada en degradado verde, mientras que la tendencia a ser menor en degradado rojo

	<i>Numero de tubos de intercambio de calor</i>						
	2	4	6	8	10	12	14
<i>req</i>	0.0226	0.0320	0.0392	0.0453	0.0506	0.0554	0.0599
<i>req/rpila</i>	0.0453	0.0640	0.0784	0.0905	0.1012	0.1109	0.1197
<i>Deq</i>	0.0453	0.0640	0.0784	0.0905	1.0905	2.0905	3.0905
	<i>Resistencia térmica del concreto</i>						
<i>Ec. 2.9</i>	0.3284	0.2917	0.2702	0.2549	-0.0092	-0.0782	-0.1197
<i>Ec. I.8</i>	0.3284	0.2917	0.2702	0.2549	0.2431	0.2334	0.2252
	<i>Cambio de temperatura promedio</i>						
<i>Ec. I.7</i>	-0.1798	-0.1658	-0.1581	-0.1528	-0.1489	-0.1458	-0.1432
<i>Ec. I.9</i>	-0.1798	-0.1658	-0.1581	-0.1528	-0.1489	-0.1458	-0.1432

Con base en los resultados anteriores, se concluye que, en primer lugar, no se detectaron errores en la programación del código. En segundo lugar, se verificaron todas las hipótesis del modelo y las expresiones analíticas utilizadas. Por último, las diferencias observadas entre los resultados del código y la modelación numérica se han atribuido a datos incorrectos. Es posible considerar que la diferencia en los resultados de calibración en esta prueba (Figura I.6) pueden deberse a que los autores modificaron el diámetro de la pila y/o las propiedades térmicas de los materiales, sin utilizar las condiciones reportadas. Esto resulta especialmente relevante en el caso de las cargas térmicas, ya que la influencia del diámetro de la pila tiene un impacto significativo en el cambio de temperatura representativo, al igual que los diferentes valores de las propiedades térmicas. Esto explicaría la notable diferencia entre los resultados del código y la modelación numérica.

ANEXO II. CÓDIGO RTEMP PARA EL CÁLCULO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA REPRESENTATIVO PARA EL DISEÑO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA

En este anexo se presenta el código desarrollado en lenguaje Matlab® 2021 para el cálculo del cambio de temperatura representativo, aplicado al diseño termo-mecánico de pilas de energía y basado en el método de Song *et al.* (2022), descrito en el apartado 2.2. El código genera los resultados más relevantes en tres vectores distintos: *deltaT_vs_tiempo*, para el cambio de temperatura representativo; $T_z(j,k)$ para la temperatura promedio en la sección transversal en el tiempo j a la profundidad k ; y $TP(j,k)$ para la temperatura en la interfaz suelo-pila en el tiempo j a la profundidad k .

Para ajustar la discretización/iteraciones del tiempo de análisis, es necesario emplear un factor relacionado con *tiempo_part* en las líneas de código, del cual derivan otras variables como t_n , w y *numero_iteraciones*. Es fundamental tener en cuenta que, independientemente del factor utilizado, el tiempo debe definirse siempre en segundos. La variable *tiempo_part* es independiente, ya que es el tiempo total de análisis que puede estar definido en segundos, minutos, horas, días, semanas, meses o años. t_n , w y *numero_iteraciones* no son independientes, y deben ser ajustadas utilizando un factor arbitrario que garantice que el valor final se exprese en segundos.

El vector de carga constante puede ajustarse añadiendo más líneas de código con valores necesarios. Para el caso de cargas variables con forma sinusoidal, el ajuste se realiza de acuerdo con una expresión derivada del análisis térmico de la edificación. En cualquier otro caso de carga térmica, es posible incluir una línea de código que lea los datos desde un archivo externo, respetando la nomenclatura establecida en el código para lectura y asignación de la carga (vector q_{-}).

clear;

%% DATOS CONSTANTES DE ENTRADA.

```
kSuelo = 1.5; % (W/m K) Conductividad térmica del suelo circundante
kConc = 2; % (W/m K) Conductividad térmica del concreto de la pila
CceSuelo = 2000; % (J/kg K) Capacidad calorífica específica del suelo
rhoSuelo = 1910; % (kg/m3) Densidad del suelo
DSuelo = kSuelo/(rhoSuelo*CceSuelo); % (m2/s) Coeficiente de difusividad térmica del suelo
circundante
H = 10; % (m) Longitud total de la pila
z = 0:0.1:H; % (m) Profundidad desde la superficie
Dpila = 0.5; % (m) Diámetro de la pila
rpila = Dpila / 2; % (m) Radio de la pila
Dtubo = 0.032; % (m) Diámetro exterior de un tubo intercambiador primario
n = 2; % Número de tubos de intercambio de calor al interior de la pila
Deq = sqrt(n) * Dtubo; % (m) Diámetro equivalente de todos los tubos de intercambio
de calor al interior de la pila
req = Deq / 2; % Radio equivalente del Deq
Rconc = (1 / (2 * pi * kConc)) * log(Dpila / Deq); % (K/W) Resistencia térmica del concreto de la pila
```

%% DATOS GENERADOS EN MATLAB

```
tiempo_part = input('Ingrese el tiempo particular: ');
Tipo=input('(1) Carga constante o (2) cargas variables: ');
if Tipo==1
    Carga=input('Carga constante (W/m)= ');
else
    Cargas = input('Ingrese tipo de cargas: (1) Balanceadas Q1, (2) No balanceadas Q2 y (3) No balanceadas Q3: ');
    Invertir= input('¿Invertir cargas? (1) Si, (2) No: ');
end
t_n = tiempo_part*3600; %En segundos
num_iteraciones = floor(t_n / (3600)); %Ajustar periodo en que se deseen resultados
```

%% GENERACIÓN DE CARGAS Y TIEMPOS DE ANÁLISIS

```
t_ = zeros(num_iteraciones+1,1); % Tiempos de análisis
q_ = zeros(num_iteraciones+1,1); % (W/m) Carga térmica
G = zeros(num_iteraciones+1,length(z)); % Función G para diferentes tiempos y profundidades
Tz = zeros(num_iteraciones+1,length(z)); % Cambio de temperatura representativa a la profundidad k
TP = zeros(num_iteraciones+1,length(z)); % Vector con la temperatura en la pared de la pila en el tiempo j
y la profundidad k
qn = zeros(num_iteraciones+1,length(z));
if Tipo==1
```

```

    q_ = Carga * ones(num_iteraciones+1, 1); %Carga constante
end
for j = 1:(num_iteraciones+1)
    t_(j) = (j-1)*3600; % Siempre en segundos (s)
    if Tipo==2
        if Cargas==1 % Cargas q_ sinusoidales para calibración
            if Invertir==1
                q_(j) = -80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j));
            else
                q_(j) = 80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j));
            end
        elseif Cargas==2
            if Invertir==1
                q_(j) = -(2/4)*80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j))-(1/4)*80*abs(sin(((2*pi)/t_n)*t_(j)));
            else
                q_(j) = (2/4)*80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j))+(1/4)*80*abs(sin(((2*pi)/t_n)*t_(j)));
            end
        elseif Cargas==3
            if Invertir==1
                q_(j) = -(2/4)*80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j))+(1/4)*80*abs(sin(((2*pi)/t_n)*t_(j)));
            else
                q_(j) = (2/4)*80*sin(((2*pi)/t_n)*t_(j))-(1/4)*80*abs(sin(((2*pi)/t_n)*t_(j)));
            end
        end
    end
end
q_(1) = 0;

%% CÁLCULOS

%% Determinación de la función G en el tiempo i a la profundidad j
for j = 1:length(z)
    for i=2:(num_iteraciones+1)
        G(i,j) = FLSM(kSuelo,z(j),DSuelo,t_(i),H,rpila);
    end
end

%% Temperatura representativa
for k = 1:length(z)
    TempParedPila = zeros(num_iteraciones+1,1); % Temperatura en la interfaz suelo-pila
    for j=2:(num_iteraciones+1)
        for i = 2:j
            dt = t_(j) - t_(i-1);
            w = idivide(dt,int32(3600));
            q = q_(i) - q_(i-1);
            TempParedPila(j) = q*G(w,k) + TempParedPila(j);
        end
        Tz(j,k) = TempPromedioSeccion(q_(j),Rconc,rpila,req,TempParedPila(j));
        TP(j,k) = TempParedPila(j);
    end
end
deltaTRepresentativa = mean(Tz,2);
deltaT_vs_tiempo = [t_, deltaTRepresentativa];

```

%% FUNCIONES

% FLSM para la temperatura en la interfaz suelo-pila

```
function[gFLSM_z] = FLSM(kSuelo,z,DSuelo,t,H,rpila)
    f = @(h) (erfc(sqrt(rpila^2 + (z - h).^2) / (2 * sqrt(DSuelo * t))) ./ sqrt(rpila^2 + (z - h).^2));
    g = @(h) (erfc(sqrt(rpila^2 + (z + h).^2) / (2 * sqrt(DSuelo * t))) ./ sqrt(rpila^2 + (z + h).^2));
    integrand = @(h) f(h) - g(h);
    gFLSM_z = 1 / (4 * pi * kSuelo) * integral(integrand, 0, H);
end
```

% Temperatura promedio de la sección transversal

```
function[T] = TempPromedioSeccion(q_n,Rconc,rpila,req,TempParedPila)
    TempLocal = @(r) ((q_n * Rconc) / (req - rpila)) * (r - rpila) + TempParedPila;
    T = (2 ./ (rpila^2 - req^2)) * (integral(@(r) TempLocal(r) .* r, req, rpila));
end
```