



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

DISEÑO TÉRMICO DE UNA CIMENTACIÓN CON PILAS DE ENERGÍA EN UNA
RESIDENCIA PARTICULAR EN EL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HUGO ALBERTO HERNÁNDEZ PALMA

TUTORA PRINCIPAL
NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO AGOSTO 2023

Vo. Bo.

Dra. Norma Patricia López Acosta



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: (NOMBRE)

Secretario: (NOMBRE)

Vocal: (NOMBRE)

1^{er.} Suplente: (NOMBRE)

2^{d o.} Suplente: (NOMBRE)

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México.

TUTORA DE TESIS:

Dra. Norma Patricia López Acosta



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación que me ha proporcionado y por todos los beneficios y servicios que me brindó durante mi estancia en el programa de maestría del posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y beneficios brindados durante mis estudios de Maestría.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) por el apoyo y atención brindada durante el proceso de titulación y elaboración de tesis.

A mi tutora de tesis, la Dra Norma Patricia López Acosta, por su apoyo, consejos y tiempo invertido en este proyecto, así como también su consideración y confianza al invitarme a participar en este tema de investigación.

Al compañero David Barba, por sus múltiples consejos, tiempo y paciencia invertidos durante el proceso de desarrollo de mis cálculos y diseño para mi proyecto de tesis.

A mis profesores, que, con sus cursos y consejos, permitieron conocer y aclarar muchas dudas de la práctica y teoría en el ejercicio de la ingeniería y geotecnia.

A mi pareja Angelica Gaistardo por su apoyo constante antes, durante y después de este proceso de Graduación y de la Maestría.

A mi madre María del Carmen, a mi padre Fermín y a mis hermanos Luis Ángel y MaryCarmen, por su gran apoyo incondicional en la búsqueda y cumplimiento de mis metas personales y profesionales.

A mis compañeros de aula, con quienes compartimos momentos importantes y nos apoyamos en todo momento dentro y fuera de la universidad, así como también a mis compañeros de titulación con quienes compartimos avances y consejos en reuniones.

A todos los que formaron parte de este sueño y de este plan de vida, se los agradezco infinitamente.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
ÍNDICE.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN	2
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. FUNDAMENTOS DE LAS PILAS DE ENERGÍA	6
2.1. Bombas de Calor Geotérmico (BCG)	6
2.2. Tipos de Bombas de Calor Geotérmico (BCG).....	8
2.3. Principio de funcionamiento de las Bombas de Calor Geotérmico.....	8
2.4. Materiales y configuraciones de las pilas de energía	9
2.5. Transferencia de calor en pilas de energía.....	10
2.5.1. Mecanismos de transferencia de calor.....	10
2.5.2. Medición de las propiedades térmicas de los suelos.....	11
2.6. Análisis térmico de pilas de energía	13
2.6.1. Generalidades	13
2.6.2. Modelos analíticos	14
2.7. Diseño de pilas de energía	17
2.7.1. Consideraciones generales.....	17
2.7.2. Códigos de diseño existentes	18
2.7.3. Método de diseño térmico de la ASHRAE.....	19
2.8. Aspectos complementarios para la aplicación de método de diseño de la ASHRAE	21
2.8.1. Determinación de la resistencia térmica del intercambiador de calor.....	21
2.8.2. Determinación de la penalización térmica.....	24
3. CASO DE ESTUDIO EN EL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO	27
3.1. Generalidades	27

3.2.	Características del sitio de estudio.....	27
3.2.1.	Ubicación.....	27
3.2.2.	Propiedades térmicas del suelo	29
3.3.	Características del proyecto	32
3.3.1.	Sistema de cimentación.....	32
3.3.2.	Cargas térmicas del <i>Proyecto C73</i>	33
3.4.	Consideraciones generales para el diseño térmico.....	33
3.4.1.	Configuración de tuberías	34
3.4.2.	Modos de operación	34
3.4.3.	Parámetros utilizados en los cálculos	36
3.5.	Diseño térmico de las pilas de energía del Proyecto C73.....	37
3.5.1.	Determinación de la resistencia térmica de las pilas de energía.....	37
3.5.2.	Penalización térmica	39
3.5.3.	Determinación de la longitud de pila.....	40
4.	PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS PILAS DE ENERGÍA EN EL SITIO DE ESTUDIO	42
4.1.	Características finales de las pilas de energía.....	42
4.1.1.	Materiales.....	42
4.1.2.	Configuración final del sistema de tuberías y pilas de energía	43
4.2.	Proceso constructivo	43
4.2.1.	Circuito primario	43
4.2.2.	Colectores y sala de máquinas	45
4.2.3.	Sistema secundario (Piso radiante).....	45
5.	CONCLUSIONES.....	47
	REFERENCIAS.....	50
	ANEXO I. REPORTE FOTOGRÁFICO CONSTRUCCIÓN DE PILAS DE ENERGÍA	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Conformación del Sistema General de Transferencia de Calor. (adaptado de Brandl, 2006)	6
Figura 2.2. Proceso de calefacción de una Bomba de Calor Geotérmico (adaptado de López-Acosta <i>et al.</i> , 2017)	7
Figura 2.3. Configuración de tuberías en pilas de energía (adaptado de Gao <i>et al.</i> , 2008)	10
Figura 3.1. Localización del Proyecto C73 y zonificación geotécnica (NTCDCC, 2017)	28
Figura 3.2. a) Muestras de arena mediana y grava fina empacada en limo, b) Fragmentos de grava gruesa empacada en arena limo, c) Estratigrafía del sitio de estudio	29
Figura 3.3. Proceso de medición con aguja térmica en el sitio de estudio: a) equipo de medición, b) personal preparando el sensor de medición, c) personal colocándose el equipo de seguridad, d) ajuste del arnés y enganchado a la grúa, e) inicio del descenso al interior del pozo, f) descenso a medio pozo de profundidad, g) descenso al fondo del pozo para el inicio de la medición de temperatura y h) medición en la parte superior del pozo	30
Figura 3.4. Proceso prueba TRT: a) preparación del sitio de prueba, b) Equipo TRT-IIUNAM, c) medición de temperatura no alterada del suelo, d) iniciación del TRT, b) sistema completo en funcionamiento durante la prueba y c) recepción de datos de medición en laptop.	31
Figura 3.5 Resultados de Ensayo de Respuesta Térmica (TRT): a) perfil de temperatura no alterada del suelo, b) variación de temperatura durante ensayo (adaptado de Rivera-Martínez, 2021)	32
Figura 3.6 Planta de cimentación <i>del Proyecto C73</i> (adaptado de López-Acosta y Barba-Galdámez, 2022)	33
Figura 3.7 Cargas térmicas por hora del Proyecto C73 para: a) un año de funcionamiento, b) semanas del 1 al 16 de enero (adaptado de López-Acosta y Barba-Galdámez, 2022)	33
Figura 3.8 Configuración de las tuberías en las pilas de energía: a) Caso A – un bucle en U, b) Caso B – dos bucles en U, c) Caso C – tres bucles en U, y d) Caso D – cuatro bucles en U conectados en serie.	34
Figura 3.9 Modos de operación evaluados para el funcionamiento de las pilas de energía: a) Modo 1 – carga total, b) Modo 2 – carga reducida del 75%, c) Modo 2 – carga reducida del 50%, d) Modo 2 – carga reducida del 25%, y e) Modo 3 – carga base.	35
Figura 3.10 Rangos de resistencia térmica R_b para distintas configuraciones de tuberías en las pilas de energía (adaptado de Loveridge <i>et al.</i> , 2012)	38

Figura 4.1. Detalle transversal de la pila..... 43

Figura 4.2 Proceso constructivo de armado de las pilas de energía: a) armado de la pila de energía, b) colocación de tuberías con termofusión, d) prueba de presión en tuberías, e) manómetro empleado en las pruebas de presión, e) perforación en el suelo, f) hizaje del armado, g) colocación dentro de la perforación y h) colado de pila..... 45

Figura 4.3. a) Tuberías provenientes de las pilas de energía, b) Unidades de distribución de tuberías para el piso radiante (colectores) y c) Sitio donde se conectará bomba de calor (sala de máquinas)..... 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Métodos teóricos para la estimación de la conductividad térmica λ (López-Acosta <i>et al.</i> , 2017)	12
Tabla 2.2 Configuraciones de tuberías y factores de forma (adaptado de Remund, 1999)	23
Tabla 3.1. Estratigrafía del sitio de estudio	29
Tabla 3.2 Resumen de cargas térmicas máxima horaria y promedio anual para los diferentes modos de operación evaluados	36
Tabla 3.3 Resumen de cargas térmicas mensuales con respecto al porcentaje de demanda energética.....	36
Tabla 3.4 Parámetros considerados para el diseño térmico.....	37
Tabla 3.5 Resistencias térmicas calculadas para las distintas configuraciones de tuberías.....	38
Tabla 3.6 Obtención de parámetros para el cálculo de penalización por temperatura T_p	39
Tabla 3.7 Valores de Penalización por temperatura T_p según la demanda térmica	39
Tabla 3.8 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 1 – Carga total para diferentes configuraciones de tuberías.....	40
Tabla 3.9 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 2 – Carga reducida para diferentes configuraciones de tuberías.....	40
Tabla 3.10 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 3 – Carga base para diferentes configuraciones de tuberías	41

RESUMEN

La búsqueda de nuevas fuentes de energía renovable es consecuencia del cambio climático y sus efectos asociados. Entre las alternativas sustentables y económicas se ha planteado impulsar el uso de pilas de energía. Estas estructuras de doble propósito funcionan como elementos de cimentación al transmitir las cargas de la superestructura al suelo y como intercambiadores de calor al transportar energía térmica del/al suelo para acondicionar espacios o edificaciones. Pese a las múltiples ventajas de esta tecnología, su implementación en México se encuentra aún en etapa de desarrollo.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis de maestría es realizar el diseño térmico de una cimentación a base de pilas de energía utilizando la metodología propuesta por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Para ello, inicialmente se exponen los conceptos básicos de las pilas de energía y los aspectos más relevantes para su diseño.

En la parte principal de este trabajo, se presentan diversos métodos de análisis propuestos en la literatura internacional para este tipo de estructuras. En particular, se describen los modelos analíticos empleados para estimar la transferencia de calor entre la pila de energía y el suelo. Posteriormente, se detalla el procedimiento implementado en el Proyecto C73 para el dimensionamiento del primer sistema de acondicionamiento de espacios basado en pilas de energía en México. Adicionalmente, se describe el procedimiento constructivo de las pilas de energía en el sitio de estudio.

Por último, se dan conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis realizados en el diseño de las pilas de energía. Como parte de las recomendaciones se indica la ventaja de utilizar la metodología empleada en esta tesis, así como una serie de sugerencias a considerar durante el diseño de estructuras termoactivas.

ABSTRACT

The search of new sources of renewable energy is a consequence of climate change and its associated effects. Among the sustainable and economic alternatives, the use of energy piles has been proposed. These dual-purpose structures function as foundation elements by transmitting loads from the superstructure to the ground and as heat exchangers by transporting thermal energy from/to the ground for conditioning spaces or buildings. However, its implementation in Mexico is still in a development stage.

In this context, the main objective of this master's thesis is to carry out the thermal design of a foundation based on energy piles using the ASHRAE methodology. With this objective, initially the basic concepts of energy piles and the most relevant aspects for their design are exposed.

In the main part of this work, various analysis methods proposed in the international literature for this type of structures are presented. In particular, the analytical models used to estimate the heat transfer between the energy pile and the ground are described. Subsequently, the procedure implemented in the Project C73 for the dimensioning of the first space conditioning system based on energy piles in Mexico is detailed. Additionally, the construction procedure of the energy piles at the study site is described.

Finally, conclusions and recommendations derived from the performed analyses in the design of the energy piles are given. As part of the recommendations, the advantage of implementing the methodology used in this thesis is highlighted, as well as a series of recommendations to consider during the design of termoactive structures.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un creciente consumo de energía procedente de combustibles fósiles. Una de las propuestas más prometedoras a nivel mundial para enfrentar este problema consiste en utilizar energías limpias y renovables que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero. Entre estas se encuentran la energía solar, la eólica y, recientemente, ha ganado popularidad la energía geotérmica. En 2005 se tuvo una producción total de aproximadamente 28 mil 268 MW a partir de fuentes geotérmicas en 72 países, de los cuales 52 por ciento fue usado en acondicionamiento térmico de espacios y viviendas, 30 por ciento en balneología (balnearios) y 18 por ciento en aplicaciones térmicas para procesos industriales y calentamiento de invernaderos y estanques (Toth, 2020). En México, a pesar de la abundancia de recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura, sus usos directos se han limitado a la balneología y los tratamientos terapéuticos, y cuenta actualmente con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 965 MW, a través de la explotación de cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, Baja California (720 MW); Los Azufres, Michoacán (195 MW); Los Humeros, Puebla (40 MW); y Las Tres Vírgenes, Baja California (10 MW). (Santoyo y Barragán Reyes, 2010).

Uno de los usos directos de la energía geotérmica, específicamente de los recursos de baja entalpía, consiste en adaptar geoestructuras para utilizar el gradiente de temperatura entre el suelo y el ambiente para la climatización de espacios. Estos sistemas son denominados como estructuras termoactivas y consisten en elementos de cimentación (pilotes, pilas, losas, muros, etc.)

equipados con un circuito cerrado de tuberías que les permite funcionar como intercambiador de calor. La aplicación más común de estos sistemas son las pilas de energía.

Por lo tanto, se han desarrollado diversos métodos analíticos y numéricos (Spitler y Bernier, 2016), (Ingersoll y Plass, 1948; Carslaw y Jaeger, 1959), Gautschi y Cahill (1964) para simular los cambios de temperatura que experimentan las pilas de energía durante su funcionamiento.

El objetivo principal de esta tesis es realizar el diseño térmico de una cimentación a base de pilas de energía utilizando la metodología propuesta por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). En este sentido, el presente trabajo pretende por una parte contribuir al desarrollo de esta tecnología a nivel nacional y, por otra, promover el conocimiento de las pilas de energía en México.

El documento está organizado en cinco capítulos, incluyendo la introducción como Capítulo 1. En el Capítulo 2, se presentan los lineamientos para los diseños geotécnico y térmico, junto con sus principales hipótesis y limitaciones. Al respecto, se detallan los criterios de rendimiento térmico y mecánico, así como los principales códigos de diseño existentes. Posteriormente, se exponen diversos métodos de análisis que existen en la actualidad para evaluar la transferencia de calor entre la estructura y el suelo. Enseguida, se describe el procedimiento implementado para el dimensionamiento de pilas de energía, basado en la metodología de la ASHRAE.

En el Capítulo 3, se realiza el diseño térmico de un sistema de cimentación a base de pilas de energía que forma parte del Proyecto denominado C73. Al inicio del capítulo, se definen las propiedades térmicas y mecánicas del sitio de estudio. Luego, se presentan de forma detallada las distintas propuestas para las configuraciones de tubería de las pilas de energía. Se determinan las cargas térmicas y los parámetros de diseño que se requieren para aplicar la metodología propuesta por la ASHRAE. Finalmente, se obtienen las longitudes de pila y se plantea una propuesta que sea adecuada para satisfacer la demanda térmica de la edificación.

En el Capítulo 4, se presenta el procedimiento constructivo de las pilas de energía implementadas en el Proyecto C73. Se detalla la instalación del sistema primario, desde la perforación hasta el montaje y colado de las pilas. Enseguida se describen los principales aspectos de la sala de máquinas, los colectores, resaltando la importancia de la conexión del sistema primario con la bomba de calor geotérmica, así como su posterior conexión al sistema secundario. Al final,

se describe la construcción del sistema secundario (piso radiante) y se exponen sus principales características.

Finalmente, en el Capítulo 5 se dan conclusiones generales y recomendaciones respecto a futuras líneas de investigación.

2. FUNDAMENTOS DE LAS PILAS DE ENERGÍA

Las pilas de energía son un tipo especial de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) de sistema cerrado, en las que se instalan tuberías de intercambio de calor en el elemento de cimentación para extraer o inyectar energía térmica del/al suelo. Estos sistemas aprovechan la diferencia de temperatura entre el suelo y el ambiente para el acondicionamiento de espacios y el abastecimiento de agua caliente doméstica. Estos sistemas pueden describirse como estructuras de doble propósito, ya que utilizan los elementos de concreto en contacto con el suelo requeridos por razones estructurales como una unidad de intercambio de calor (Abuel-Naga *et al.*, 2015).

2.1. Bombas de Calor Geotérmico (BCG)

En general, el sistema de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) se divide en tres componentes principales: a) circuito primario, b) bomba de calor y c) circuito secundario (Figura 2.1).

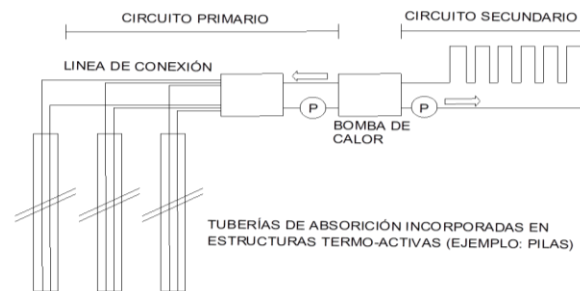


Figura 2.1. Conformación del Sistema General de Transferencia de Calor. (adaptado de Brandl, 2006)

El circuito primario se encarga de intercambiar calor con el suelo a través de un sistema cerrado de tuberías instalado dentro de elementos en contacto con el terreno, denominado intercambiador de calor. Dependiendo del tipo de BCG, el intercambiador de calor puede estar conformado por pozos, estructuras termo-activas (p. ej.: pilas de energía, barretes de energía, muros diafragma), entre otros. Los principales mecanismos de transferencia de calor que tienen lugar en este proceso son la conducción y la convección (De Moel *et al.*, 2010).

Una bomba de calor es un maquina térmica que se encarga de transmitir calor de un foco de baja temperatura hacia otro de mayor temperatura (Çengel y Boles, 2006), la cual puede utilizarse para el enfriamiento o calefacción de espacios. La Figurar 2.2 muestra esquemáticamente la operación de una bomba de calor en modo de calefacción. En este caso, el calor fluye de una fuente (suelo, agua o aire) hacia el fluido refrigerante (que se encuentra a una menor temperatura), evaporándolo. El vapor se traslada hasta el compresor, en donde se incrementan su presión y temperatura. Posteriormente, el refrigerante se utiliza para aumentar la temperatura del agua que fluye a través del circuito secundario, el cual a su vez distribuye el calor en la edificación. La extracción de calor produce que el refrigerante regrese a su fase líquida. Por último, el refrigerante atraviesa una válvula de expansión donde se reduce su presión y temperatura, iniciando así un nuevo ciclo (Meyer *et al.*, 2011). La operación de la bomba de calor puede ser reversible. De esta forma, las bombas de calor se utilizan en invierno para extraer energía térmica del suelo transfiriéndola al interior de la edificación, mientras que en verano extrae calor del interior y lo traslada al suelo (De Moel *et al.*, 2010).

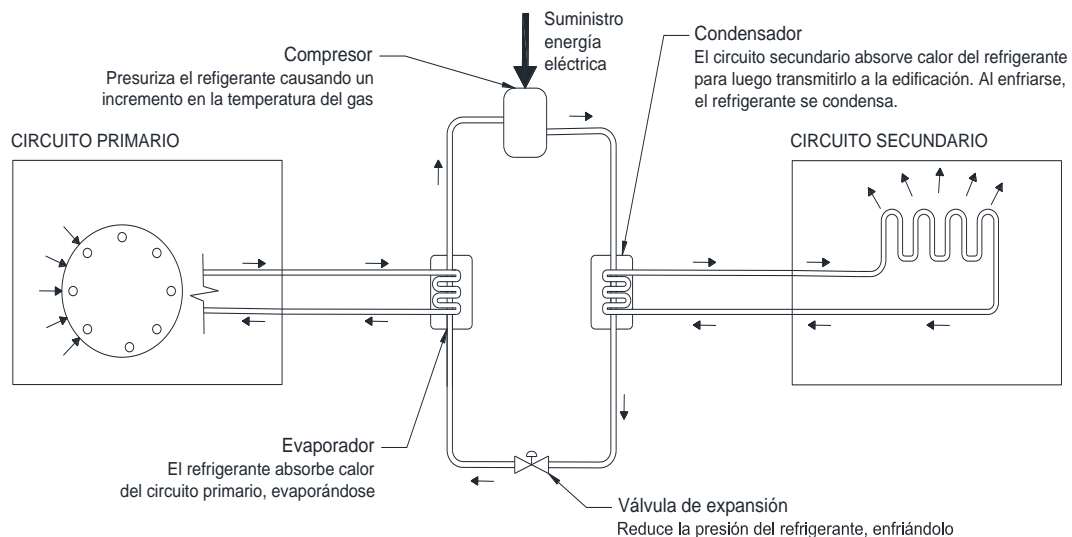


Figura 2.2. Proceso de calefacción de una Bomba de Calor Geotérmico (adaptado de López-Acosta *et al.*, 2017)

El circuito secundario consiste en una red de tuberías embebidas en muros y/o pisos de edificios, casas, puentes y carreteras. Su función principal es utilizar la energía térmica extraída para fines de calefacción durante el invierno y recibir el calor no deseado de sus alrededores en verano para transferirlo al suelo (De Moel *et al.*, 2010).

2.2. Tipos de Bombas de Calor Geotérmico (BCG)

Las BCG se clasifican en dos tipos: sistemas abiertos y cerrados. Los sistemas abiertos utilizan el suelo como un sistema de almacenamiento térmico y envían agua subterránea hacia un sistema de calentamiento (pozo) que proporciona energía térmica al circuito secundario mediante la bomba de calor. Posteriormente, el agua con baja temperatura regresa al suelo a través de un segundo pozo o canalizándolo al exterior (De Moel *et al.*, 2010).

El sistema de circuito cerrado transfiere calor indirectamente entre el suelo y el circuito primario, fluyendo a través de tuberías colocadas horizontal o verticalmente. Los sistemas verticales tienen un área menor, longitudes de tubería más cortas, menor costo de bombeo y mayor eficiencia con menos variabilidad; mientras que los sistemas horizontales se ven afectados por las fluctuaciones superficiales temperatura. Las pilas de energía y sus componentes conforman un tipo de bomba de calor geotérmico (BCG) de sistema cerrado en el cual las tuberías de intercambio de calor se instalan en el elemento de cimentación (Brandl, 2006).

2.3. Principio de funcionamiento de las Bombas de Calor Geotérmico

De acuerdo con Mimouni (2014), existen dos formas de operar las Bombas de Calor Geotérmico: a) inyección/extracción pura, y 2) almacenamiento estacional. En los sistemas de inyección/extracción pura, la operación del sistema es unidireccional (extracción durante invierno o inyección en verano) permitiendo que el suelo regrese a su condición térmica inicial cuando el acondicionamiento no es requerido. Por otra parte, los sistemas estacionales inyectan y extraen calor del suelo de forma cíclica a lo largo del año, creando un equilibrio durante un período completo de calentamiento-enfriamiento. En consecuencia, son mecanismos más sustentables y con mayor rentabilidad económica.

La eficiencia energética de las bombas de calor se cuantifica a través del coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés *Coefficient of Performance*), que se define como:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (2.1)$$

donde Q es el calor obtenido/rechazado del sistema y W es la energía eléctrica suministrada a la bomba. El valor del COP depende de la diferencia de temperatura entre los medios. Entre mayor sea la diferencia de temperaturas, menor será la eficiencia del Sistema (Banks, 2012).

2.4. Materiales y configuraciones de las pilas de energía

Los materiales más utilizados para la construcción de pilas de energía son: concreto prefabricado o colado en sitio y acero. Las características favorables del concreto (alta conductividad térmica y capacidad calorífica) mejoran la eficiencia térmica de los sistemas intercambiadores de calor (Suryatriyastuti *et al.*, 2012). Por ello, las pilas de energía de concreto con los elementos más utilizados en el mundo (Brandl, 2006).

En general, las tuberías del circuito primario están fabricadas de polietileno de alta densidad (PEAD) y se sujetan al acero de refuerzo. Las tuberías suelen llenarse con agua y presurizarse para resistir las presiones de la pared externa provocadas por el concreto durante el colado, las cuales disminuyen una vez que fragüe el concreto. Los diámetros de las tuberías varían usualmente entre 20 y 25 mm y su longitud depende de las dimensiones de la pila (De Moel *et al.*, 2010).

El fluido conductor de calor que fluye a través de las tuberías permite el intercambio de energía con el suelo. En climas cálidos, el agua es el fluido más empleado. Sin embargo, en climas fríos, se utilizan soluciones anticongelantes como las mezclas de agua y glicol, soluciones salinas, salmuera, acetato de potasio o incluso el metanol para evitar posibles rupturas de las tuberías. A pesar de las bajas temperaturas, estos fluidos conservan sus propiedades para transmitir y recibir calor (De Moel *et al.*, 2010).

Las tuberías instaladas adoptan la apariencia de bucles continuos y su elección afecta la eficiencia general del sistema. Las formas más comunes son: tuberías en U simples, dobles y triples o tuberías en W (Figura 2.3). Las tuberías simples o múltiples en forma de U o en forma de W son los principales tipos instalados dentro de las pilas de energía. Las tuberías en forma de U simples se consideran la opción más eficiente económicamente y en trabajabilidad (Gao *et al.*, 2010).

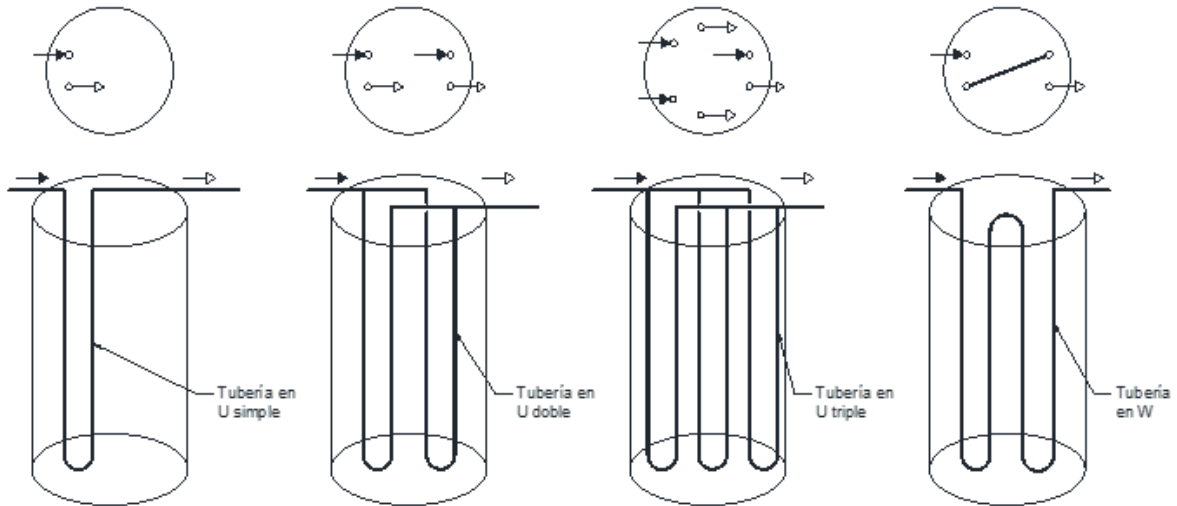


Figura 2.3. Configuración de tuberías en pilas de energía (adaptado de Gao *et al.*, 2008)

2.5. Transferencia de calor en pilas de energía

2.5.1. Mecanismos de transferencia de calor

Durante su funcionamiento, las pilas de energía transfieren calor primordialmente a través de dos mecanismos: conducción y convección (Loveridge y Powrie, 2013). En la conducción, la energía térmica se transmite de una región a otra debido a interacciones entre partículas. En un medio homogéneo e isotrópico, la expresión matemática que describe la conducción de calor puede expresarse como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.2)$$

donde T es la temperatura y α es la difusividad térmica del medio. La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que describe qué tan rápido el medio responde a cambios de temperatura y puede determinarse como:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_s \rho} \quad (2.3)$$

donde ρ es la densidad del medio, λ es su conductividad térmica y C_s es su capacidad calorífica específica. La conductividad térmica es una constante de proporcionalidad que refleja la capacidad del material de conducir calor, mientras que la capacidad calorífica específica mide la capacidad de almacenar calor y se define como la cantidad de energía por unidad de masa requerida para aumentar en un grado la temperatura.

Por otra parte, la convección ocurre entre medios que se mueven relativamente entre sí, usualmente fluidos (Brandl, 2006). En este caso, la transferencia de calor (q_{conv}) se determina como:

$$q_{conv} = C_s \rho \bar{v} \Delta T \quad (2.4)$$

donde \bar{v} es la velocidad media y ΔT es la diferencia de temperatura entre los medios.

Considerando los diferentes componentes de las pilas de energía, Abdelaziz *et al.* (2011) describen el proceso de transferencia de calor de la siguiente manera: a) convección entre fluido y paredes interiores de tuberías, b) conducción a través de las tuberías, c) conducción a través del concreto de las pilas, y d) conducción y convección (si hubiese) en el suelo.

La conducción es usualmente el proceso con mayor influencia en la transferencia de calor en los suelos. No obstante, estudios analíticos y numéricos sugieren que el impacto de la convección es significativo para velocidades de flujo mayores o iguales a $1 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ (Loveridge, 2012).

2.5.2. Medición de las propiedades térmicas de los suelos

El diseño térmico eficaz de pilas de energía requiere una adecuada caracterización de las propiedades térmicas del suelo. Considerando los mecanismos de transferencia de calor dominantes en pilas de energía descritos en el apartado anterior, las principales propiedades térmicas requeridas son la capacidad calorífica específica (C_s), la conductividad térmica (λ) y la difusividad térmica (α). Estas dependen de la temperatura y se encuentran relacionadas a partir de la Ec. 2.3.

La medición de las propiedades térmicas del suelo puede efectuarse con pruebas de campo o de laboratorio. En general, las pruebas de laboratorio son relativamente más económicas, rápidas y permiten controlar adecuadamente las condiciones de frontera (Barry-Macaulay *et al.*, 2013). Sin embargo, debido a la heterogeneidad inherente del suelo, se requieren varias determinaciones separadas para obtener un valor representativo (Loveridge *et al.*, 2017; López-Acosta *et al.*, 2021; López-Acosta *et al.*, 2022). Por otra parte, las pruebas de campo evalúan volúmenes más grandes de suelos bajo las condiciones reales de campo, pero son costosas y su ejecución requiere de más tiempo que las pruebas de laboratorio (Akrouch *et al.*, 2014).

Tanto los ensayos de campo como los de laboratorio se dividen en dos categorías: estacionarios y transitorios. Los métodos estacionarios miden la temperatura de una muestra de suelo sometida a gradientes de temperatura constante. Los

métodos transitorios miden la conductividad térmica de los suelos cuando la temperatura del suelo cambia por el calentamiento o enfriamiento (De Moel *et al.*, 2010). Entre los de laboratorio más utilizados se encuentran el método de la aguja térmica (ASTM D5334-14, 2014) Y la prueba de placa caliente (ASTM C177-19, 2019). Por otra parte, el ensayo de campo estándar en la industria geotérmica es el Ensayo de Respuesta Térmica (TRT, por sus siglas en inglés *Thermal Response Test*) (Eklöf y Gehlin, 1996). Un compendio detallado de los diferentes métodos para determinar propiedades térmicas de suelos enfocado en estructuras termo-activas puede consultarse en Vieira *et al.* (2017).

A pesar de su importancia, en proyectos pequeños, las propiedades térmicas de los suelos suelen definirse con base en valores recomendados en la literatura o se determinan a partir de modelos predictivos (Brandl, 2006; Mikhaylova *et al.*, 2016). La capacidad calorífica específica C_s puede estimarse con precisión a partir de la capacidad calorífica específica de los diferentes componentes del suelo. Por lo que su valor queda definido por:

$$C_s = C_{s,s}X_s + C_{s,w}X_w + C_{s,a}X_a \tag{2.5}$$

donde $C_{s,s}$, $C_{s,w}$, $C_{s,a}$ son la capacidad calorífica de la parte sólida, agua y aire respectivamente; mientras X_s , X_w , X_a son las fracciones volumétricas de cada fase. En los suelos saturados, el valor de C_s puede calcularse de la porosidad n :

$$C_s = (1 - n)C_{s,s} + nC_{s,w} \tag{2.6}$$

La conductividad térmica λ es un parámetro complejo de estimar, depende de la mineralogía, porosidad, microestructura, propiedades químicas del agua, grado de saturación, humedad y temperatura del suelo (Abuel-Naga *et al.*, 2015). Para estudios preliminares, el valor de λ de suelos saturados (o secos) puede estimarse de forma similar a la capacidad calorífica. (López Acosta *et al.*, 2017) (Tabla 2.3).

Tabla 2.1 Métodos teóricos para la estimación de la conductividad térmica λ (López-Acosta *et al.*, 2017)

N°	Método	Expresión**	Comentario
1	Media aritmética	$\lambda = \lambda_s X_s + \lambda_f X_f$	Sobrestima el valor de λ (límite superior)
2	Media armónica	$\lambda = \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_s X_f + \lambda_f X_s}$	Subestima el valor de λ (límite inferior)
3	Media geométrica	$\lambda = \lambda_s^{X_s} \lambda_f^{X_f}$	Valores intermedios respecto a métodos 1 y 2

** Nota: λ es la conductividad térmica del suelo, λ_s es la conductividad de la fase sólida, λ_f es la conductividad del fluido (agua o aire), X_s es la fracción volumétrica de la fase sólida, X_f es la fracción volumétrica del fluido.

2.6. Análisis térmico de pilas de energía

2.6.1. Generalidades

El análisis térmico de pilas de energía involucra el uso de soluciones analíticas y semi-analíticas que simulan el proceso de transferencia de calor desde el líquido conductor de calor hasta el suelo. Las consideraciones generales para estos análisis son (Bourne-Webb *et al.*, 2016):

- La transferencia de calor dentro de las tuberías se efectúa a través de conducción en las paredes de la tubería y de convección en el fluido dentro de la misma.
- La temperatura inicial del suelo (T_g) se considera constante e igual a la temperatura ambiente promedio del sitio de estudio.

De acuerdo con Laloui y Rotta Loria (2019), la diferencia (ΔT) entre la temperatura promedio del fluido que recorre las pilas de energía (T_f) y la temperatura inalterada del suelo (T_g) al aplicar una carga térmica por unidad de longitud (q) constante puede determinarse como:

$$\Delta T = T_f - T_g = q[R_b + G(t)] \quad (2.7)$$

donde R_b es la resistencia térmica de la pila de energía (mKW^{-1}) y $G(t)$ es una función dependiente del tiempo (t) que considera la respuesta térmica del suelo en la periferia de la pila de energía de radio r_b . El valor de R_b se estima con base en la geometría de la pila de energía, el número de tuberías instaladas, la velocidad de circulación del fluido y las propiedades térmicas de los materiales utilizados (Kavanaugh y Rafferty, 2014). Por otra parte, la función $G(t)$ suele determinarse aplicando diferentes modelos analíticos de transferencia de calor por conducción en medios continuos (Li y Lai, 2015). Entre los modelos más utilizados se encuentran el de Fuente Lineal Infinita (ILSM), el modelo de Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM) y el modelo de Fuente Lineal Finita (FLSM).

Las cargas térmicas q a las que se ven sometidas las pilas de energía no suelen ser constantes. Sus valores varían en función de los cambios en las condiciones atmosféricas a lo largo del año. Dichos cambios pueden evaluarse utilizando el principio de superposición temporal. Dado que las cargas térmicas de las edificaciones suelen definirse de forma escalonada con valores constantes por hora o por día, ΔT puede determinarse como:

$$\Delta T(i) = q(t_i)R_b + \sum_{j=1}^i [q(t_i) - q(t_j)]G(t_i - t_j) \quad (2.8)$$

La Ec. 2.8 puede ser reescrita como (Bernier *et al.*, 2004):

$$\Delta T(i) = q(t_i)R_b + \sum_{j=1}^i q(t_j)[G(t_j) - G(t_{j+1})] \quad (2.9)$$

2.6.2. Modelos analíticos

2.6.2.1. Fuente de líneal infinita (ILS)

Este modelo de fuente líneal infinita (ILS, por sus siglas en inglés *Infinity Line Source*) considera la transferencia radial de calor por conducción en un medio continuo, homogéneo e isótropo debida a una fuente líneal infinita (cilindro de diámetro tan pequeño que es despreciable). En estas condiciones, la temperatura T en un punto ubicado a una distancia r de la fuente líneal infinita puede calcularse como (Ingersoll y Plass, 1948; Carslaw y Jaeger, 1959):

$$T = T_g + \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.10)$$

donde E_1 es la función integral exponencial, T_g es la temperatura inicial del medio (°C), q es la carga térmica específica (W m^{-1}), λ es la conductividad térmica del medio ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), α es la difusividad térmica del medio ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), r es la distancia radial desde la fuente de línea (m), t es el tiempo que se ha aplicado la fuente de línea continua (s).

Gautschi y Cahill (1964) propusieron una expansión de la función integral exponencial en series de Taylor como:

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n \cdot n!} \quad (2.11)$$

Carslaw y Jaeger (1959) presentaron una forma simplificada de la Ec. 2.11 aplicable para valores grandes de t .

$$T = T_g + \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right) \quad (2.12)$$

El máximo error de la Ec. 2.12 es del 2%, cuando $t > 5r^2/\alpha$. Con base en lo anterior, y considerando que el flujo de calor dentro de la pila de energía se encuentra en condiciones establecidas, la temperatura promedio del fluido T_f debido a una carga térmica constante q puede calcularse como:

$$T_f = T_g + \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + qR_b \quad (2.13)$$

donde R_b es la resistencia térmica efectiva del pozo (K W m^{-1}).

2.6.2.2. Fuente cilíndrica infinita (ICS)

El modelo de fuente cilíndrica e infinita (ICS, por sus siglas en inglés *Infinite Cylindrical Source*) considera el proceso de transferencia radial de calor desde un cilindro hueco e infinito rodeado de un medio continuo, homogéneo e isótropo, en

el cual, la transferencia de calor ocurre por conducción pura. Si se considera que el radio del cilindro hueco e infinito es r_b , la temperatura promedio del fluido T_f debido a una carga térmica constante q puede calcularse como (Spitler *et al.*, 2020):

$$T_f = T_g + \frac{q}{\lambda} G(F_0) + q * R_b^* \quad (2.14)$$

donde F_0 es el número de Fourier ($\alpha t/r_b^2$) y $G(F_0)$ está dado por:

$$G(F_0) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty (e^{-\beta^2 F_0} - 1) + \frac{J_0(\beta)Y_1(\beta) - Y_0(\beta)J_1(\beta)}{\beta^2(J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta))} d\beta \quad (2.15)$$

donde $J_0(-)$ y $J_1(-)$ se refieren a las funciones Bessel de primera especie de orden 0 y 1, mientras que $Y_0(-)$ y $Y_1(-)$ son las funciones Bessel de segunda especie de orden 0 y 1, respectivamente. Cooper (1976) y Bernier (2001) presentan expresiones algebraicas simplificadas para determinar los valores de la Ec. 2.15 sin la necesidad de efectuar la integración. En particular, la expresión de Bernier (2001) es ampliamente utilizada en la práctica:

$$G(F_0) = 10^{[-0.89129 + 0.36081 \log F_0 - 0.05508 \log^2 F_0 + 0.00359617 \log^3 F_0]} \quad (2.16)$$

2.6.2.3. Fuente lineal finita (FLS)

Las soluciones ILS e ICS no consideran la naturaleza bidimensional de la transferencia de calor del suelo, que puede tener efectos significativos para análisis a largo plazo (después de un año de funcionamiento). En estos casos, se recomienda utilizar la solución de fuente lineal finita (FLS, por sus siglas en inglés *Finite Line Source*) (Spitler y Bernier, 2016).

La solución de FLS determina la temperatura en un punto (r, z) debido a una fuente línea finita de longitud H ubicada a una distancia D de la superficie del suelo. Para una temperatura de superficie constante e igual a la temperatura inalterada del suelo T_g , la solución está dada por (Zheng *et al.*, 2002):

$$T(r, z, t) = T_g + \frac{q}{4\pi\lambda} \int_D^{D+H} \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2+(z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2+(z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z+h)^2}} \right) dh \quad (2.17)$$

donde *erfc* es la función de error complementaria. La temperatura media integral para una línea finita de longitud H_2 colocada a una distancia D_2 de la superficie del suelo y ubicado a cierta distancia r de la línea hundida en el tiempo t , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T(r, t) = T_g + \frac{\frac{q}{4\pi\lambda} \int_{D_2}^{D_2+H_2} \int_D^{D+H} \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2+(z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2+(z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z+h)^2}} \right) dh dz}{H_2} \quad (2.18)$$

La solución de la Ec. 2.18 requiere extensos cálculos debido a la doble integración. Lamarche y Beauchamp (2007) reformularon el problema en una sola integral para el caso específico D y $D_2=0$ reduciendo el tiempo de cálculo (Spitler y Bernier, 2016).

2.6.2.4. Funciones de respuesta (Funciones g)

La superposición es una herramienta poderosa para el análisis sistemas de varios pozos intercambiadores de calor o pilas de energía. La función g proporciona la temperatura de la pared de la perforación (pozo intercambiador de calor o pila de energía) T_b para una configuración de elementos específica sometidos a una carga térmica q constante:

$$T_b = T_g + \frac{q}{2\pi\lambda} * g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}, \frac{D}{H}\right) \quad (2.19)$$

donde B es la distancia entre elemento, D representa la profundidad a la que está enterrada la tubería de conexión horizontal y t_s es el tiempo adimensional definido por:

$$t_s = \frac{H^2}{9\alpha} \quad (2.20)$$

Eskilson (1987) desarrolló diferentes funciones g para configuraciones específicas de pozos intercambiadores de calor, utilizando valores específicos de la relación B/H y un valor de 0.0005 de la relación r_b/H . Valores para otras relaciones pueden calcularse utilizando la ecuación:

$$g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b^*}{H}, \frac{B}{H}, \frac{D}{H}\right) = g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}, \frac{D}{H}\right) - \ln\left(\frac{r_b^*}{r_b}\right) \quad (2.21)$$

Las funciones g propuestas por Eskilson (1987) utilizan un valor supuesto de D/H de 4 a 5 m de profundidad.

Eskilson (1987) presentó funciones g hasta un valor máximo de $\ln(t/t_s)=4.5$. Esta relación varía con la profundidad de los pozos intercambiadores de calor y las propiedades térmicas del suelo, pero tomando los típicos valores como una profundidad de 100 m y una difusividad térmica de 0.1 m²/día, $\ln(t/t_s)=-4.5$ correspondiente a 123 días. Estos datos de la función g se pueden ampliar aún más utilizando la aproximación de fuente de línea. Sin embargo, esto está limitado por la precisión de la fuente de línea en tiempos cortos. Yavuzturk y Spitler (1999) ampliaron los datos de la función g a tiempos mayores utilizando una simulación numérica detallada de pozos intercambiadores de calor. Modelos numéricos

Los métodos numéricos son la herramienta más avanzada para el estudio de las estructuras termoactivas. Estos modelos permiten simular las etapas de enfriamiento/calentamiento en el suelo, los distintos componentes de los sistemas geotérmicos, los cambios de temperatura a través del tiempo y la heterogeneidad del suelo. Por lo tanto, se están convirtiendo en métodos más rentables y ampliamente utilizados para resolver ecuaciones diferenciales con diferentes condiciones de frontera (Soga y Rui, 2016). Los modelos numéricos utilizados en el análisis térmico de las pilas de energía se pueden agrupar en tres categorías en función del método de modelización: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos.

Los modelos numéricos son poco prácticos para las aplicaciones de ingeniería ya que sus cálculos demandan mayores recursos de cómputo y tiempos de ejecución. Además, debido a las características geométricas de las pilas de energía y la variedad de escalas temporales que hay que considerar durante la transferencia de calor, estos métodos no suelen ser viables para el diseño de los sistemas energéticos. Por ello, se cuentan con pocos estudios publicados en los que se utilice dicho procedimiento Hellstrom, (1991), Eskilson, (1987), Zarella *et al.* (2013) desarrollaron un modelo que permite diseñar los pozos y analizar el rendimiento del sistema. Existen dos versiones del modelo, una no tiene en cuenta las capacidades térmicas de los componentes internos de la pila y otra que tiene en cuenta las capacidades térmicas del concreto y el fluido. Este último es capaz de considerar distintas configuraciones de tuberías, múltiples pilas, su interacción y calcular la temperatura variable de salida. No obstante, a pesar de sus múltiples ventajas, su uso se ha visto restringido a proyectos de investigación.

2.7. Diseño de pilas de energía

2.7.1. Consideraciones generales

El diseño de un sistema a base de pilas de energía implica conocer los requerimientos de calentamiento y enfriamiento de la edificación, la ocupación del inmueble, las propiedades del suelo y definir si la cimentación es capaz de proporcionar la demanda energética sin asistencia adicional.

Los principales parámetros de diseño, como las dimensiones de las pilas de energía y su espaciamiento están predeterminados por el diseño estructural y geotécnico de la cimentación. Por lo tanto, es esencial determinar con precisión la energía térmica máxima que puede proporcionar el sistema geotérmico. Dicho proceso puede ser complejo y llevar mucho tiempo, además de no ser tan preciso debido a los limitados enfoques de diseño existentes (Makasis *et al.*, 2018). Por otra parte, la elección del fluido de transferencia de calor es importante para mejorar el rendimiento del sistema. Su selección como se comentó anteriormente

depende de las características del sitio, las condiciones de temperatura, disponibilidad, economía y sus propiedades no corrosivas (De Moel *et al.*, 2010).

En la actualidad, no existen normas o códigos de diseño que indiquen cómo se debe medir el rendimiento de los intercambiadores de calor. En la práctica, los enfoques analíticos para la evaluación de la capacidad térmica de las cimentaciones a base de pilas de energía se basan en los métodos desarrollados para los pozos intercambiadores de calor. No obstante, las pilas de energía son diferentes a los pozos intercambiadores de calor en los siguientes aspectos:

- Las pilas de energía pueden instalarse en patrones semi-regulares o irregulares.
- No todas las pilas de energía instaladas son de la misma longitud.
- La relación de aspecto (longitud-diámetro) es diferente, entre 500 y 2000 para pozos intercambiadores de calor, y entre 15 y 50 para la mayoría de las pilas de energía.

Cuando las soluciones convencionales desarrolladas para pozos intercambiadores de calor se aplican a pilas de energía de gran diámetro (con una relación de aspecto pequeña), se puede subestimar el cambio de temperatura en escalas de tiempo pequeñas (Soga, 2016). Por otra parte, la mayor sección transversal de las pilas se traduce en superficie potencial para la inclusión de más tuberías de transferencia de calor y más opciones para su disposición. Estos detalles influyen en la respuesta térmica del intercambiador de calor. Asimismo, mayor volumen de concreto implica que el intercambiador de calor tarde más tiempo en alcanzar una condición de flujo de calor establecido. En consecuencia, hay un almacenamiento térmico significativo a corto plazo dentro de la pila (Bourne Webb *et al.*, 2016).

2.7.2. Códigos de diseño existentes

Actualmente, ningún país ha incluido en sus normas o códigos de diseño la integración de intercambiadores de calor en pilas. Ante la falta de normas oficiales, diversos organismos en Europa han elaborado guías y documentos estableciendo procedimientos de planificación, diseño e instalación de estos sistemas. Entre éstas se encuentran:

- **Guía alemana VDI 4640 Parte 2 (2001).** Incluye información limitada sobre el diseño de estructuras termoactivas. Establece que las pilas de energía se pueden considerar como pozos intercambiadores de calor.
- **Guía Suiza SIA D0190 (2005).** Ofrece más información para el diseño de las estructuras termoactivas, especialmente para las pilas de energías. Proporciona orientación sobre construcción, consideraciones de diseño (cargas adicionales) y el efecto del movimiento diferencial cuando solo un

porcentaje de las pilas son destinadas para la transferencia de calor. La guía se refiere al uso del programa PILASIM para el cálculo del rendimiento de la calefacción de una instalación de energía eléctrica.

- **Guía del Reino Unido (GSHPA, 2012).** En el Reino Unido, la Asociación de bombas de calor geotérmico (GSHPA, por sus siglas en inglés *Ground Source Heat Pump Association*) ha publicado una guía que cubre normas de diseño, instalación y materiales para proyectos que incorporen pilas de energía.
- **Recomendaciones del Comité Francés de Mecánica de Suelos (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2016).** El Comité Francés de Mecánica de Suelos (CFMS, por sus siglas en francés Comité Français de Mécanique des Sols) desarrolló en conjunto SYNTEC-INGENIERIE y SOFFONS/FNTP una serie de recomendaciones para la construcción y diseño de estructuras termoactivas, tomando en cuenta los efectos de los cambios de temperatura en el comportamiento mecánico de la cimentación.

2.7.3. Método de diseño térmico de la ASHRAE

El método propuesto por la ASHRAE consiste en estimar la longitud de los intercambiadores de calor (pilas de energía en este caso) requerida para satisfacer las cargas térmicas de la edificación. El método supone que la transferencia de calor en las inmediaciones de la pila de energía se produce únicamente por conducción y considera condiciones de funcionamiento desfavorable representadas por tres pulsos térmicos con duraciones de 10 años ($\Delta\tau_y$), 1 mes ($\Delta\tau_m$) y 4 horas ($\Delta\tau_h$) (Philippe *et al.*, 2010).

Las magnitudes de las cargas térmicas transmitidas al suelo se determinan a partir de las cargas térmicas de la edificación y el coeficiente de desempeño COP de la bomba de calor utilizada (Abdelaziz *et al.*, 2015). Para cargas de enfriamiento se tiene:

$$Q = Q_e \left(1 + \frac{1}{COP_e} \right) \quad (2.22)$$

donde Q es la carga transmitida al suelo (W), Q_e es la carga de enfriamiento de la edificación (W) y COP_e es el coeficiente de desempeño en modo enfriamiento. En modo calentamiento parte de la energía eléctrica suministrada a la bomba se traduce en energía calorífica que se transfiere al edificio, por lo que se tiene:

$$Q = Q_c \left(1 - \frac{1}{COP_c} \right) \quad (2.23)$$

donde Q_c es la carga de calentamiento de la edificación y COP_c es el coeficiente de desempeño en modo calentamiento.

Para la deducción de la ecuación de diseño, la ASHRAE considera inicialmente un intercambiador de calor equivalente de longitud L igual a la suma de las longitudes conjunto de intercambiadores. Así, utilizando los conceptos descritos en el apartado “2.6.2. Modelos analíticos”, la diferencia entre la temperatura promedio del fluido que recorre el intercambiador de calor equivalente (T_f) y la temperatura inalterada del suelo (T_g) debido a la aplicación de los tres pulsos térmicos puede determinarse como:

$$T_g - T_f = \frac{Q_b}{L} R_b + \left\{ \frac{Q_y}{L} [G(t_1) - G(t_2)] + \frac{Q_m}{L} [G(t_2) - G(t_3)] + \frac{Q_h}{L} G(t_3) \right\} \quad (2.24)$$

donde $t_1 = (\Delta\tau_y + \Delta\tau_m + \Delta\tau_h)$, $t_2 = (\Delta\tau_m + \Delta\tau_h)$, $t_3 = \Delta\tau_h$, y Q_y , Q_m , y Q_h son las cargas térmicas asociadas a los pulsos de 10 años, 1 mes y 4 horas, respectivamente. Para la determinación de las funciones $G(t)$, el método de la ASHRAE recomienda utilizar el modelo de fuente cilíndrica infinita (ICL). Definiendo las resistencias térmicas del suelo para los pulsos térmicos de 10 años ($R_{g,y}$), 1 mes ($R_{g,m}$) y 4 horas ($R_{g,h}$) como:

$$R_{g,y} = G(t_1) - G(t_2) \quad (2.25)$$

$$R_{g,m} = G(t_2) - G(t_3) \quad (2.26)$$

$$R_{g,h} = G(t_3) \quad (2.27)$$

se tiene:

$$T_g - T_f = \frac{Q_b R_b + Q_y R_{g,y} + Q_m R_{g,m} + Q_h R_{g,h}}{L} \quad (2.28)$$

Despejando la longitud del intercambiador de calor equivalente se tiene:

$$L = \frac{Q_b R_b + Q_y R_{g,y} + Q_m R_{g,m} + Q_h R_{g,h}}{T_g - T_f} \quad (2.29)$$

La temperatura del fluido dentro del intercambiador de calor equivalente (T_f) puede calcularse como el promedio de la temperatura de entrada (ELT, por sus siglas en inglés *Entering Liquid Temperature*) y la temperatura de salida (LLT, por sus siglas en inglés *Leaving Liquid Temperature*) a la bomba de calor. Por lo que:

$$L = \frac{Q_b R_b + Q_y R_{g,y} + Q_m R_{g,m} + Q_h R_{g,h}}{T_g - \frac{ELT + LLT}{2}} \quad (2.30)$$

Para considerar las pérdidas de calor entre las tuberías de ingreso y salida del intercambiador, la ASHRAE propone un factor de corrección F_{sc} :

$$L = \frac{Q_h R_b + Q_y R_{g,y} + Q_m R_{g,m} + F_{sc} Q_h R_{g,h}}{T_g - \frac{ELT + LLT}{2}} \quad (2.31)$$

La Ec. 2.31 no considera la interacción térmica entre el conjunto de intercambiadores de calor. Por lo que, para evitar problemas en el funcionamiento a largo plazo del sistema, la ASHRAE incorpora una penalización térmica (T_p) en el denominador. De esta forma, la ecuación de diseño queda finalmente definida como:

$$L = \frac{Q_h R_b + Q_y R_{g,y} + Q_m R_{g,m} + F_{sc} Q_h R_{g,h}}{T_g - \frac{ELT + LLT}{2} + T_p} \quad (2.32)$$

La Ec. 2.32 debe aplicarse considerando las cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento de la edificación de forma independiente. De esta forma se obtienen dos longitudes (L_c y L_e), de las cuales se selecciona la de mayor valor.

Para definir la carga térmica Q_y , Q_m y Q_h , la ASHRAE sugiere un método simplificado utilizando las cargas de diseño pico de calentamiento y enfriamiento de la edificación. El procedimiento emplea el concepto de horas de carga equivalente (EFLH, por sus siglas en inglés equivalent full-load hour) y factores de carga parciales (PLFm). Dichos factores se encuentran tabulados para diferentes ciudades en Estados Unidos. De forma alternativa, los valores de Q_y , Q_m y Q_h pueden determinarse a partir de la distribución de cargas térmicas por hora que suelen ser determinados por el consultor encargado del diseño del sistema integral de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés Heating, Ventilation, and Air Conditioning).

2.8. Aspectos complementarios para la aplicación de método de diseño de la ASHRAE

2.8.1. Determinación de la resistencia térmica del intercambiador de calor

Para la determinación de la resistencia térmica R_b , el método de la ASHRAE supone que las condiciones de flujo dentro del intercambiador se encuentran en estado establecido. En estas condiciones, se tiene:

$$R_b = R_{p,conv} + R_{p,cond} + R_c \quad (2.33)$$

donde $R_{p,conv}$ es la resistencia térmica por convección entre el fluido y las paredes interiores de las tuberías, $R_{p,cond}$ es la resistencia térmica por conducción dentro de las tuberías y R_c es la resistencia térmica por conducción en el interior del intercambiador de calor.

Asumiendo una distribución espacial uniforme de la temperatura en las paredes interiores de las tuberías, el valor de $R_{p,conv}$ puede calcularse como (Hellstrom, 1991):

$$R_{p,conv} = \frac{1}{2\pi n r_i h_i} \quad (2.34)$$

donde n es el número de tuberías dentro del intercambiador de calor, r_i es el diámetro interno de las tuberías y h_i es el coeficiente de transferencia de calor. Para la determinación de h_i se utiliza el número de Nusselt N_u (Loveridge, 2012):

$$h_i = \frac{N_u \lambda_f}{2r_i} \quad (2.35)$$

donde λ_f es la conductividad térmica del fluido. Para flujos turbulentos, se puede utilizar la ecuación de Dittus-Boetler (Winterton, 1998) para determinar N_u . Por lo que:

$$h_i = \frac{0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.35} \lambda_f}{2r_i} \quad (2.36)$$

donde R_e es el número de Reynolds y P_r el número de Prandtl. El valor de R_e puede determinarse como (McAllister, 2013):

$$R_e = \frac{\bar{v} d_i}{\nu} \quad (2.37)$$

donde d_i es el diámetro interno de la tubería y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Mientras que P_r está definido por (Laloui y Rotta Loria, 2019):

$$P_r = \frac{C_{s,f} \mu}{\lambda_f} \quad (2.38)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido y $C_{s,f}$ es la capacidad calorífica específica del fluido.

La resistencia térmica por conducción dentro de las tuberías $R_{p,cond}$ se puede evaluar utilizando la ecuación de la resistencia de un cilindro hueco con temperatura constante en las superficies interior y exterior. Para n tubos en paralelo se tiene (Loveridge, 2012):

$$R_{p,cond} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi n \lambda_p} \quad (2.38)$$

donde r_o y r_i son los radios externos e internos de la tubería, respectivamente, y λ_p es la conductividad térmica de la tubería.

Por otra parte, la determinación de la resistencia térmica por conducción en el interior del intercambiador de calor R_c es un proceso más complejo, por lo que diversos métodos de estimación han sido propuestos en la literatura internacional. En general, estos métodos pueden clasificarse en dos grupos: empíricos y teóricos.

Entre los métodos empíricos se destacan la propuesta de Shonder y Beck (2000) y la de Remund (1999). El método de Shonder y Beck (2000) considera al intercambiador de calor como un cilindro hueco equivalente con un diámetro externo igual al radio del intercambiador r_b y un radio efectivo igual a $r_o\sqrt{n}$. De esta forma, despreciando la posición de las tuberías dentro del intercambiador de calor, el valor de R_c puede determinarse como:




$$R_c = \frac{\ln\left(\frac{r_b}{r_o\sqrt{n}}\right)}{2\pi\lambda_b} \tag{2.39}$$

donde λ_b es la conductividad térmica del relleno del intercambiador de calor (concreto en el caso de pilas de energía).

Por otra parte, el método de Remund (1999) utiliza factores de forma empíricos (β_0 y β_1) determinados a partir ajuste de datos experimentales para diferentes arreglos geométricos de tuberías (Tabla 2.2). De esta forma, el valor de R_c se estima como:

$$R_c = \left[\beta_0 \left(\frac{r_b}{r_o}\right)^{\beta_1} \lambda_b \right]^{-1} \tag{2.40}$$

Tabla 2.2 Configuraciones de tuberías y factores de forma (adaptado de Remund, 1999)

Configuración	Esquema	β_0	β_1
A		20.10	-0.9447
B		17.44	-0.6052
C		21.91	-0.3796

El método de la ASHRAE recomienda la utilización del método de Remund (1999). Sin embargo, pese a su simplicidad, este procedimiento no es adecuado para su aplicación en pilas de energía ya que los factores de forma β_0 y β_1 fueron desarrollados únicamente para pozos intercambiadores de calor y no toman en cuenta configuraciones con más de dos pares de tuberías.

Los métodos teóricos asumen que cada tubería es una fuente de calor lineal o un multipolo (un número complejo derivado de una fuente lineal) y utilizan el principio de superposición para determinar exactamente el flujo de calor relacionado con cada tubería y, así, la resistencia general del intercambiador de calor. Recientemente, Claesson y Javed (2020) desarrollaron el primer procedimiento específico para pilas de energía con base en este concepto. De acuerdo con dichos autores, el valor de R_c puede calcularse como:

$$R_c = \frac{1}{2\pi n \lambda_b} \left[\ln \left(\frac{r_b^n}{n r_o r_c^{n-1}} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_b^{2n}}{r_b^{2n} - r_c^{2n}} \right) \right] \quad (2.41)$$

donde r_c es la distancia radial entre tuberías y σ se calcula como:

$$\sigma = \frac{\lambda_b - \lambda}{\lambda_b + \lambda} \quad (2.42)$$

donde λ es la conductividad térmica del suelo.

2.8.2. Determinación de la penalización térmica

Para la determinación de la penalización térmica (T_p), el método de la ASHRAE considera un grupo de intercambiadores de calor separados a una distancia uniforme S_{bore} . En estas condiciones, se asume que cada intercambiador de calor puede transferir (o extraer) energía al suelo libremente hasta una longitud igual a $S_{bore}/2$. En consecuencia, la energía que debería transmitirse a mayores distancias se acumula en las inmediaciones de cada intercambiador de calor.

La cantidad de calor que se almacena en el suelo (Q_{stored}) se estima usando las variaciones de temperatura que debería producir un intercambiador de calor actuando de forma independiente. Para ello, se divide al suelo alrededor del intercambiador de calor en un conjunto de cilindros huecos con radios incrementales (r_i) y se calcula el cambio de temperatura a la mitad de los cilindros $\Delta T_{c,i}$. De esta forma, Q_{stored} se calcula multiplicando los cambios de temperatura estimados para los cilindros con radios superiores a $S_{bore}/2$, por su masa y la capacidad calorífica específica del suelo C_s :

$$Q_{stored} = \sum_{i=1}^{\infty} \rho_s C_s \pi L_{bore} (r_{i+1}^2 - r_i^2) \Delta T_{c,i} \quad (2.43)$$

donde L_{bore} es la longitud de cada intercambiador de calor y ρ_s es la densidad del suelo. El número de cilindros huecos necesarios para reemplazar adecuadamente la condición de $r=\infty$, depende del contenido de humedad y las características de porosidad del suelo que rodea la línea de fuente de calor. En general, la ASHRAE recomienda utilizar cilindros en los cuales el cambio de temperatura ($\Delta T_{c,i}$) sea mayor a 0.3°C.

Para el cálculo de $\Delta T_{c,i}$, la ASHRAE sugiere utilizar la carga térmica promedio anual Q_y y el modelo de fuente lineal e infinita (ILS). En particular, aconseja emplear la aproximación propuesta por Ingersoll *et al.* (1954):

$$\Delta T_{c,i} = \frac{Q_y I \left[\frac{r}{2\sqrt{\alpha \Delta \tau_y}} \right]}{2\pi \lambda L_{bore}} \quad (2.44)$$

donde r es el radio medio del cilindro hueco de análisis $(r_{i+1} + r_i)/2$, α es la difusividad térmica del suelo, λ es la conductividad térmica del suelo e $I(\cdot)$ es una función definida por:

$$I(X) = -0.969 \ln(X) - 0.186 \quad (2.45)$$

Conociendo el calor almacenado Q_{stored} , el cambio de temperatura promedio en el suelo alrededor del intercambiador de calor (T_{p1}) puede calcularse como:

$$T_{p1} = \frac{Q_{stored}}{\rho C_p S_{bore}^2 L_{bore}} \quad (2.46)$$

La Ec. 2.46 es aplicable únicamente a un intercambiador de calor rodeado por otros cuatro elementos. En consecuencia, para el cálculo de la penalización térmica T_p , el valor de T_{p1} se debe prorratear en función de las características del grupo de intercambiadores de calor de interés:

$$T_p = \frac{N_{int} + 0.75N_{lado} + 0.5N_{esquina} + 0.5N_{intermedio} + 0.25N_{final}}{m C_{fHoriz}} t_{p1} \quad (2.47)$$

donde m es el número total de intercambiadores de calor, N_{int} es el número de intercambiadores internos (rodeado por otros 4), N_{lado} número de intercambiadores de calor de lado (rodeado por otros 3), $N_{esquina}$ número de intercambiadores de calor de esquina (rodeados por otros 2), $N_{intermedio}$ número de intercambiadores de calor en medio de una fila (rodeados por otros 2) y N_{final}

número de pozos en la parte final de una línea (rodeado solo por 1 pozo), mientras que C_{fHoriz} , W_{Field} y L_{Field} se obtienen con las siguientes expresiones:

$$C_{fHoriz} = \frac{(2L_{bore} (W_{Field} + L_{Field})) + (W_{Field} L_{Field})}{2 L_{bore} (W_{Field} + L_{Field})} \quad (2.48)$$

$$W_{Field} = (N_{Wide} - 1) S_{bore} \quad (2.49)$$

$$L_{Field} = (N_{Long} - 1) S_{bore} \quad (2.50)$$

donde W_{Field} es el ancho del arreglo de los intercambiadores de calor en metros y L_{Field} es el largo del arreglo de los intercambiadores de calor en metros (Kavanaugh *et al.*, 2014).

3. CASO DE ESTUDIO EN EL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

3.1. Generalidades

En el presente capítulo se describe el diseño térmico de la cimentación con pilas de energía de un proyecto ubicado en el poniente de la Ciudad de México, denominado *Proyecto C73*. La edificación consiste en una edificación unifamiliar con un área de construcción de aproximadamente 500 m². El *Proyecto C73* constituye la primera edificación climatizada con estructuras termoactivas en México. El diseño térmico se efectuó de forma conservadora siguiendo la metodología propuesta por la ASHRAE para bombas de calor geotérmico (Kavanaugh y Rafferty, 2014), considerando las cargas térmicas estimadas por el consultor energético e información geotécnica y térmica recopilada en el sitio de construcción.

3.2. Características del sitio de estudio

3.2.1. Ubicación

El sitio de estudio se localiza al poniente del Valle de México (Figura 3.1). De acuerdo con la Zonificación Geotécnica, se encuentra en la Zona I de Lomas, caracterizada por suelos de alta resistencia y poco compresibles (NTCDCC, 2017).

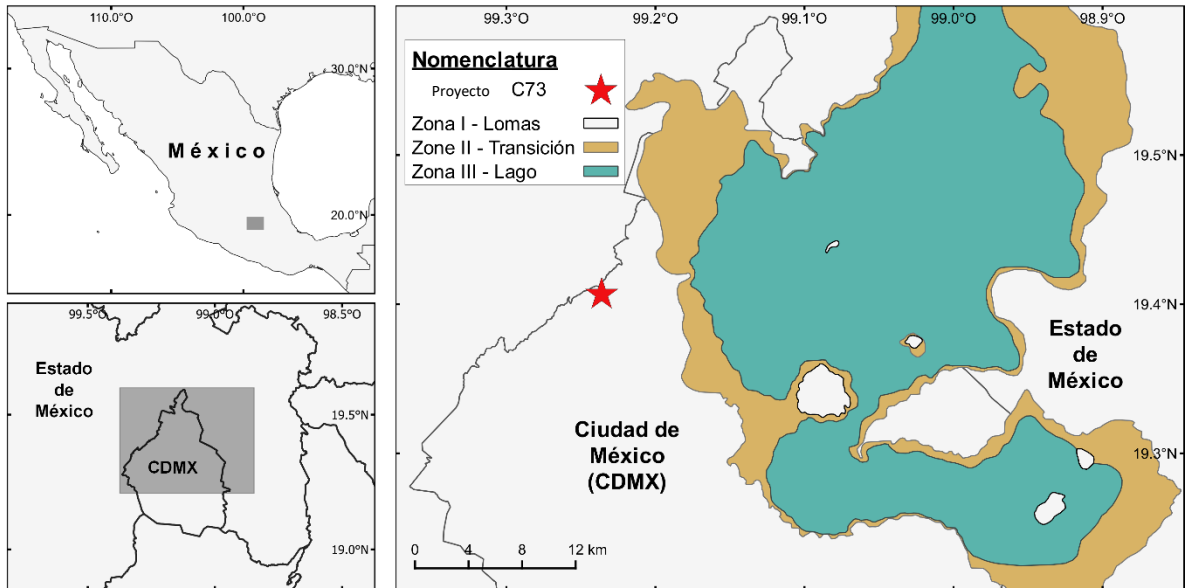


Figura 3.1. Localización del Proyecto C73 y zonificación geotécnica (NTCDCC, 2017)

Estratigrafía

Las condiciones del subsuelo del sitio de estudio se obtuvieron a partir de la exploración geotécnica efectuada por terceros en 2020 (INGGEOTEC, 2020). Los trabajos de exploración consistieron en sondeos mixtos de aproximadamente 20 m de profundidad combinando la técnica de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés *Standard Penetration Test*) y avance sin muestreo con broca tricónica y barril NQ en estratos de mayor resistencia. Los resultados indican que la estratigrafía del sitio está compuesta principalmente por arenas limosas con grava (Figuras 3.2a y 3.2b) y que el nivel freático medio en la zona se encuentra a más de 20 m de profundidad. Con base en esta información, el perfil estratigráfico se dividió en siete unidades geotécnicas (Figura 3.2c), cuya descripción se presenta con detalle en la Tabla 3.1.

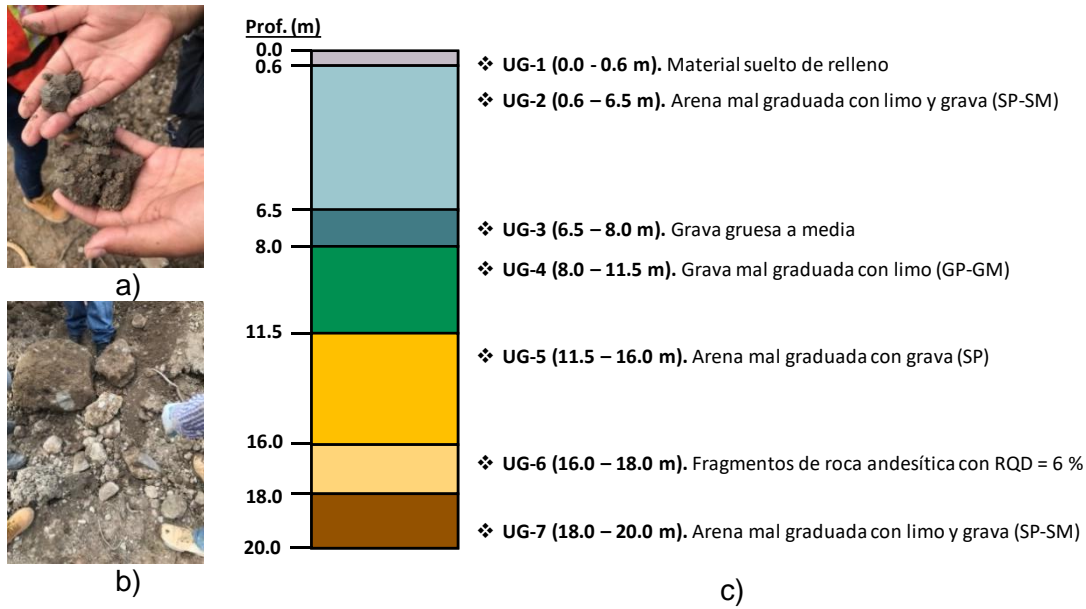


Figura 3.2. a) Muestras de arena mediana y grava fina empacada en limo, b) Fragmentos de grava gruesa empacada en arena limo, c) Estratigrafía del sitio de estudio

Tabla 3.1. Estratigrafía del sitio de estudio

Unidad Geotécnica	Profundidad	Descripción del material
UG-1	De 0.0 a 0.6 m	Material de relleno suelto con un número de golpes en la prueba SPT (N_{SPT}) promedio de 21.
UG-2	De 0.6 a 6.5 m	Arena limosa (SP-SM), con un N_{SPT} mayor a 50.
UG-3	De 6.5 a 8.0 m	Grava mal graduada, con un N_{SPT} mayor a 50.
UG-4	De 8.0 a 11.5 m	Grava limosa (GP-GM), con un N_{SPT} mayor a 50 .
UG-5	De 11.5 a 16.0 m	Arena mal graduada y grava fina (SP) y (GP). No. De golpes en la prueba SPT > 50.
UG-6	De 16.0 a 18.0 m	Fragmentos de roca andesítica Con índice de calidad de roca (RQD) igual a 6%.
UG-7	De 18.0 a 20.0 m	Arena limosa con grava fina (SP-SM). No. De golpes en la prueba SPT > 50.

3.2.2. Propiedades térmicas del suelo

Como se indicó en el apartado “2.7 Diseño de pilas de energía”, las propiedades térmicas requeridas para el diseño térmico de pilas de energía utilizando el método de la ASHRAE son: a) temperatura inicial no alterada del suelo (T_0), b) conductividad térmica del suelo (λ), c) difusividad térmica del suelo (α) y d) resistencia térmica de la pila (R_b). Estos parámetros pueden obtenerse mediante ensayos *in situ* y pruebas de laboratorio. Para el presente caso de estudio, las propiedades anteriormente mencionadas se determinaron de dos formas: a) prueba de la aguja térmica y b) Ensayo de Respuesta Térmica (TRT, por sus siglas en inglés *Thermal Response Test*).

La determinación de las propiedades térmicas mediante la prueba de la aguja térmica se realizó con base en el procedimiento descrito en la norma ASTM D5334-14 (2014) utilizando el equipo comercial KD2 Pro (Figura 3.3a). Este equipo consiste en una unidad de lectura, un elemento calentador en forma de aguja y un sensor medidor de temperatura (López-Acosta *et al.*, 2021; López-Acosta *et al.*, 2022a). En general, la prueba consta de dos etapas. En la primera etapa (fase de calentamiento), se inserta la aguja en el suelo y se deja reposar hasta alcanzar el equilibrio térmico con el medio. Posteriormente, se aplica una corriente eléctrica, inyectando calor a una tasa constante al suelo. Lo anterior, produce el aumento de la temperatura en el medio, que se registra a intervalos cortos de tiempo. En la segunda etapa (fase de recuperación o enfriamiento), se desconecta la fuente de calor y se registra la disminución de la temperatura con respecto al tiempo (Portillo- Arreguín *et al.*, 2018). Con el objeto de determinar la conductividad térmica del suelo a distintas profundidades, personal del Instituto de Ingeniería (IIUNAM) descendió con arnés en la perforación de una de las pilas de energía (Figuras 3.3b, c, d y e) y ejecutó la prueba en las paredes de la perforación (Figuras 3.3f, g y h). Dicho procedimiento se efectuó a cada 2 m hasta alcanzar 11 m de profundidad.

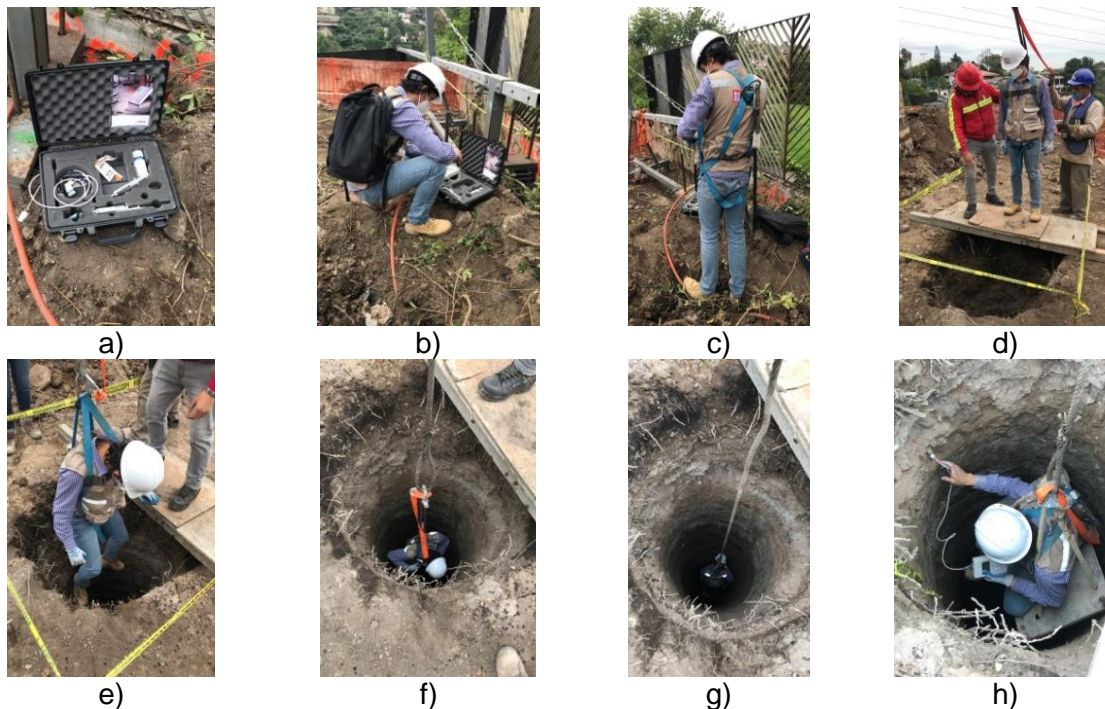


Figura 3.3. Proceso de medición con aguja térmica en el sitio de estudio: a) equipo de medición, b) personal preparando el sensor de medición, c) personal colocándose el equipo de seguridad, d) ajuste del arnés y enganchado a la grúa, e) inicio del descenso al interior del pozo, f) descenso a medio pozo de profundidad, g) descenso al fondo del pozo para el inicio de la medición de temperatura y h) medición en la parte superior del pozo

El Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) es la prueba estándar en la industria geotérmica para determinar la conductividad térmica (λ) y la resistencia térmica de pozos intercambiadores de calor y/o pilas de energía (R_b). El TRT consiste en inyectar calor al suelo a una tasa constante y monitorear los cambios de temperatura producidos (López Acosta *et al.*, 2022). La duración del ensayo depende de las características del intercambiador de calor (pozo y/o pila de energía), pudiéndose extender desde un par de días hasta meses. La principal ventaja del TRT es que permite obtener valores efectivos de las propiedades térmicas en condiciones reales de campo, eliminando los problemas de extracción, transporte y manejo de muestras inalteradas asociadas a las pruebas de laboratorio.

Para la ejecución del TRT en el sitio de estudio se utilizó un equipo móvil diseñado y construido recientemente por el IIUNAM, denominado equipo móvil TRT-IIUNAM (López-Acosta *et al.*, 2022b). El TRT se realizó en diciembre de 2020 en una pila de energía de concreto de 0.8 m de diámetro y 15.5 m de longitud. La pila de energía estaba equipada con cuatro bucles en U conectados en serie conformados con tubería de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de 25 mm de diámetro interior.

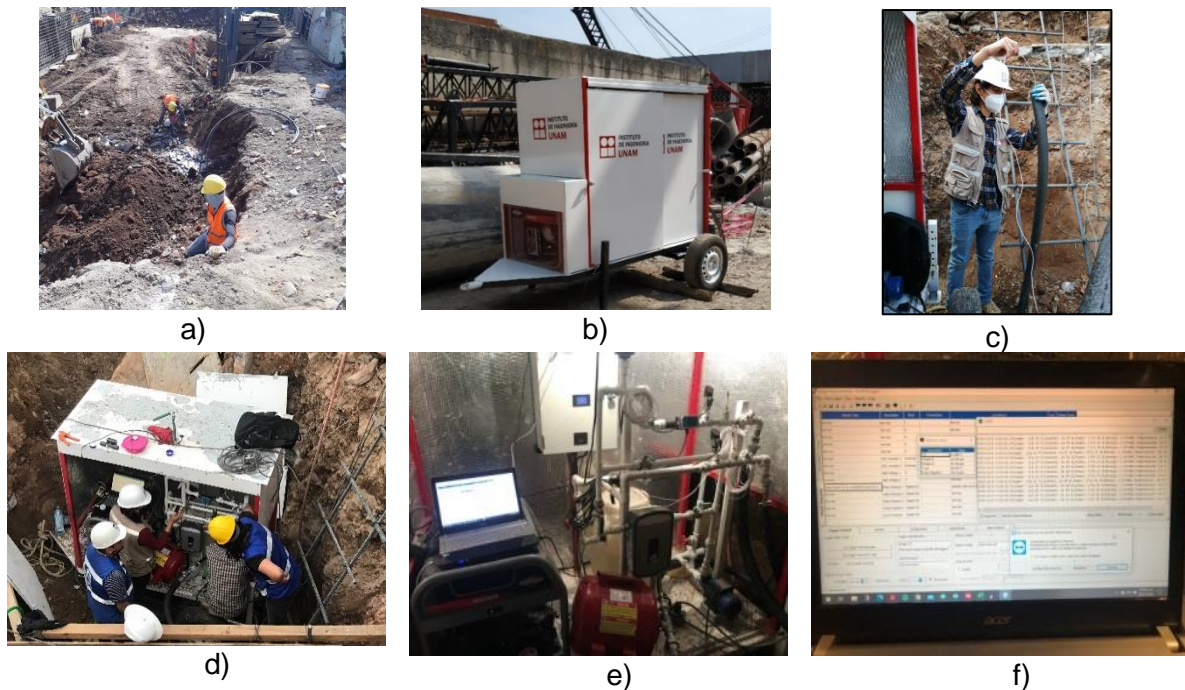


Figura 3.4. Proceso prueba TRT: a) preparación del sitio de prueba, b) Equipo TRT-IIUNAM, c) medición de temperatura no alterada del suelo, d) iniciación del TRT, e) sistema completo en funcionamiento durante la prueba y f) recepción de datos de medición en laptop.

El perfil de temperatura no alterada del suelo y la variación con el tiempo de la temperatura media del fluido circulante medida con el TRT se muestran en la Figura 3.5. A partir de estos resultados, se estimó (Rivera Martínez, 2021) que la temperatura inicial no alterada del suelo (T_0) en el sitio de estudio es $18.8\text{ }^\circ\text{C}$, la resistencia térmica de la pila de 80 cm de diámetro (R_b) es $0.09\text{ m }^\circ\text{C W}^{-1}$, la difusividad térmica del suelo (α) es $1.4 \times 10^{-6}\text{ m}^2\text{s}^{-1}$, y la conductividad térmica del suelo (λ) es $1.63\text{ W m}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

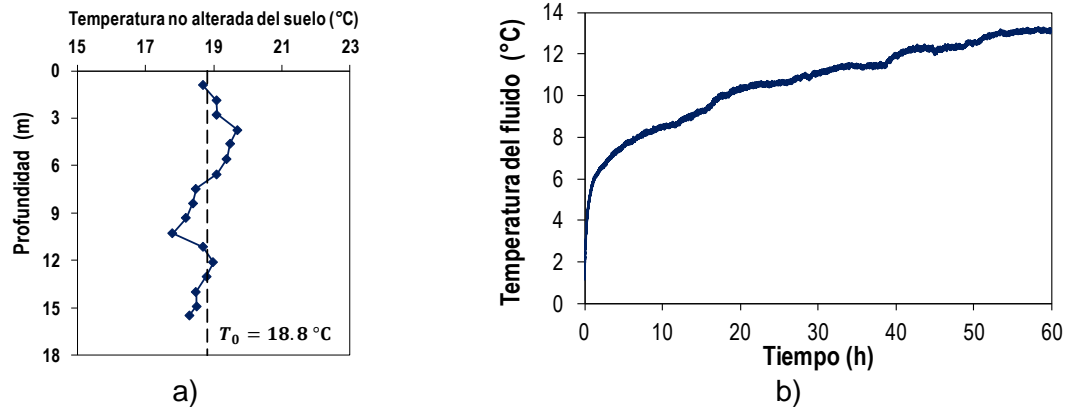


Figura 3.5 Resultados de Ensayo de Respuesta Térmica (TRT): a) perfil de temperatura no alterada del suelo, b) variación de temperatura durante ensayo (adaptado de Rivera-Martínez, 2021)

3.3. Características del proyecto

3.3.1. Sistema de cimentación

El sistema de cimentación del *Proyecto C73* consta de ocho pilas de 15.5 m de profundidad y dos tipos de diámetros: $D_1=100\text{ cm}$ y $D_2=80\text{ cm}$. La separación centro a centro de las pilas varía de 4.74 a 9.47 m. Para fines de diseño, y dado que Kavanaugh y Rafferty (2014) recomiendan separar los pozos/pilas de energía al menos 6 m entre sí para evitar posibles interferencias térmicas, se consideró que únicamente seis de las ocho pilas trabajasen como pilas de energía (Figura 3.6). En consecuencia, se cuenta con un total de 93 m de pilas de energía, 62 m de pilas de 100 cm de diámetro y 31 m de pilas de 80 cm de diámetro (Figura 3.6).

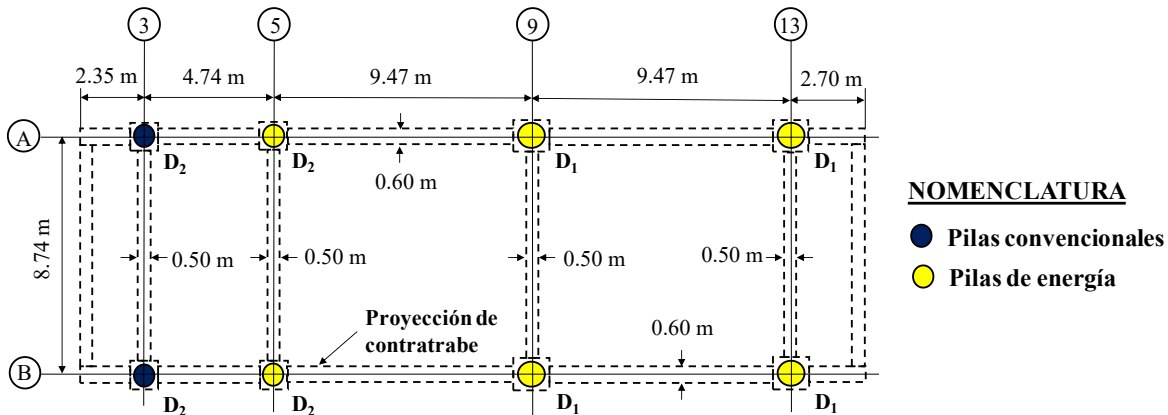


Figura 3.6 Planta de cimentación del Proyecto C73 (adaptado de López-Acosta y Barba-Galdámez, 2022)

3.3.2. Cargas térmicas del Proyecto C73

Simulaciones numéricas efectuadas por el consultor encargado del diseño del sistema integral de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) del Proyecto C73 indican que la edificación requiere únicamente de cargas de calentamiento. En general, la demanda de energía de calentamiento se concentra en los meses de noviembre a febrero (Figura 3.7a). La carga térmica máxima se estimó en 22.8 kW, con un promedio anual de 2.1 kW. Las cargas térmicas varían considerablemente durante el día, siendo las horas de máxima demanda de 2:00 a.m. a 8:00 a.m. (Figura 3.7b).

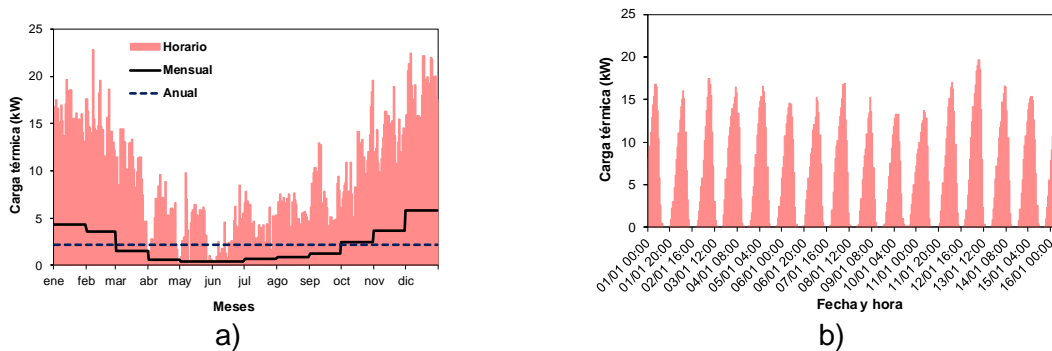


Figura 3.7 Cargas térmicas por hora del Proyecto C73 para: a) un año de funcionamiento, b) semanas del 1 al 16 de enero (adaptado de López-Acosta y Barba-Galdámez, 2022)

3.4. Consideraciones generales para el diseño térmico

Dado que las características principales de las pilas de energía (longitud y diámetro) se encuentran definidas por el diseño estructural y geotécnico del sistema de cimentación, el objetivo del diseño térmico se concentró en estimar la máxima energía que el sistema de pilas de energía puede proveer al Proyecto C73. Para ello, se determinó la longitud total de pilas de energía requerida para

satisfacer total o parcialmente las cargas térmicas demandadas por la edificación, considerando diferentes arreglos de bucles y modos de operación. Debido a que la metodología de diseño propuesta por la ASHRAE considera que todos los intercambiadores de calor (pozos y/o pilas de energía) tienen un mismo diámetro, se efectuaron dos diseños, el primero considerando que las seis pilas de energía cuentan con un diámetro de 0.8 m y el segundo en el cual todas las pilas de energía cuentan con un diámetro de 1.0 m. Así, de forma conservadora, la máxima energía del sistema de pilas de energía se seleccionó como el menor valor obtenido de los dos diseños. A continuación, se presenta una descripción de las cargas térmicas, configuración de bucles y modos de operación considerados.

3.4.1. Configuración de tuberías

De acuerdo con lo indicado en el apartado “3.3.1. Sistema de cimentación”, se dispone de un total de 93 m de longitud de pilas de energía. Con el objetivo de maximizar la energía que dicha longitud de pilas de energía puede proveer a la edificación se evaluaron cuatro posibles configuraciones de tubería, correspondientes a arreglos de 1 (Caso A), 2 (Caso B), 3 (Caso C) y 4 (Caso D) bucles en U conectados en serie (Figura 3.8).

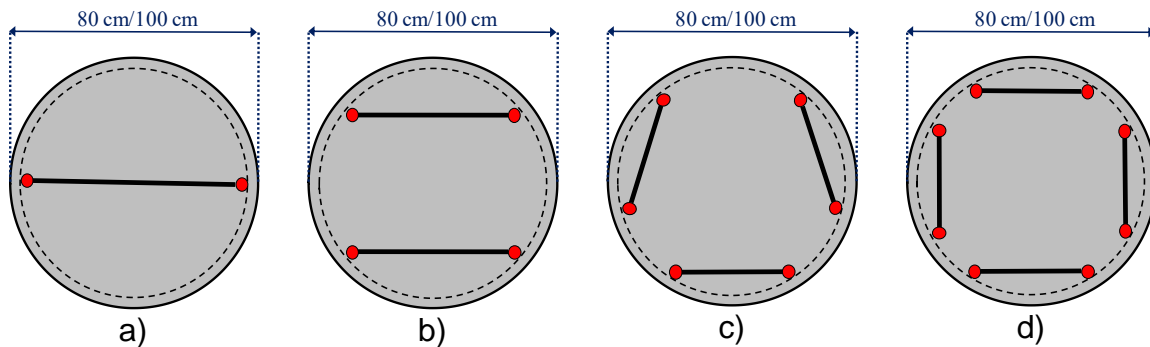


Figura 3.8 Configuración de las tuberías en las pilas de energía: a) Caso A – un bucle en U, b) Caso B – dos bucles en U, c) Caso C – tres bucles en U, y d) Caso D – cuatro bucles en U conectados en serie.

3.4.2. Modos de operación

De acuerdo con lo indicado en el apartado “3.3.1. Sistema de cimentación”, se dispone de un total de 93 m de longitud de pilas de energía. Con el objetivo de maximizar la energía que dicha longitud de pilas de energía puede proveer a la edificación se analizaron tres modos de operación:

- a) **Modo 1: Carga total.** Considera que la totalidad de las cargas térmicas serán provistas por las pilas de energía (Figura 3.9a).
- b) **Modo 2: Carga reducida.** Considera que pilas de energía se encuentran en funcionamiento continuo a lo largo de todo el año, pero solamente proveen un porcentaje de las cargas térmicas requeridas. En este caso, el

resto de las cargas térmicas es provisto por un sistema de enfriamiento convencional. Para este modo de operación se evaluaron tres porcentajes para la carga térmica provista por las pilas de energía, correspondientes al 75%, 50% y 25% de la carga térmica (Figuras 3.9b, c, y d).

c) Modo 3: Carga base. Considera que las pilas de energía proveen la totalidad de las cargas térmicas únicamente en los meses de máxima demanda (enero, febrero, noviembre y diciembre) (Figura 3.9e). Para el resto de meses, las cargas térmicas son provisto por un sistema de enfriamiento convencional.

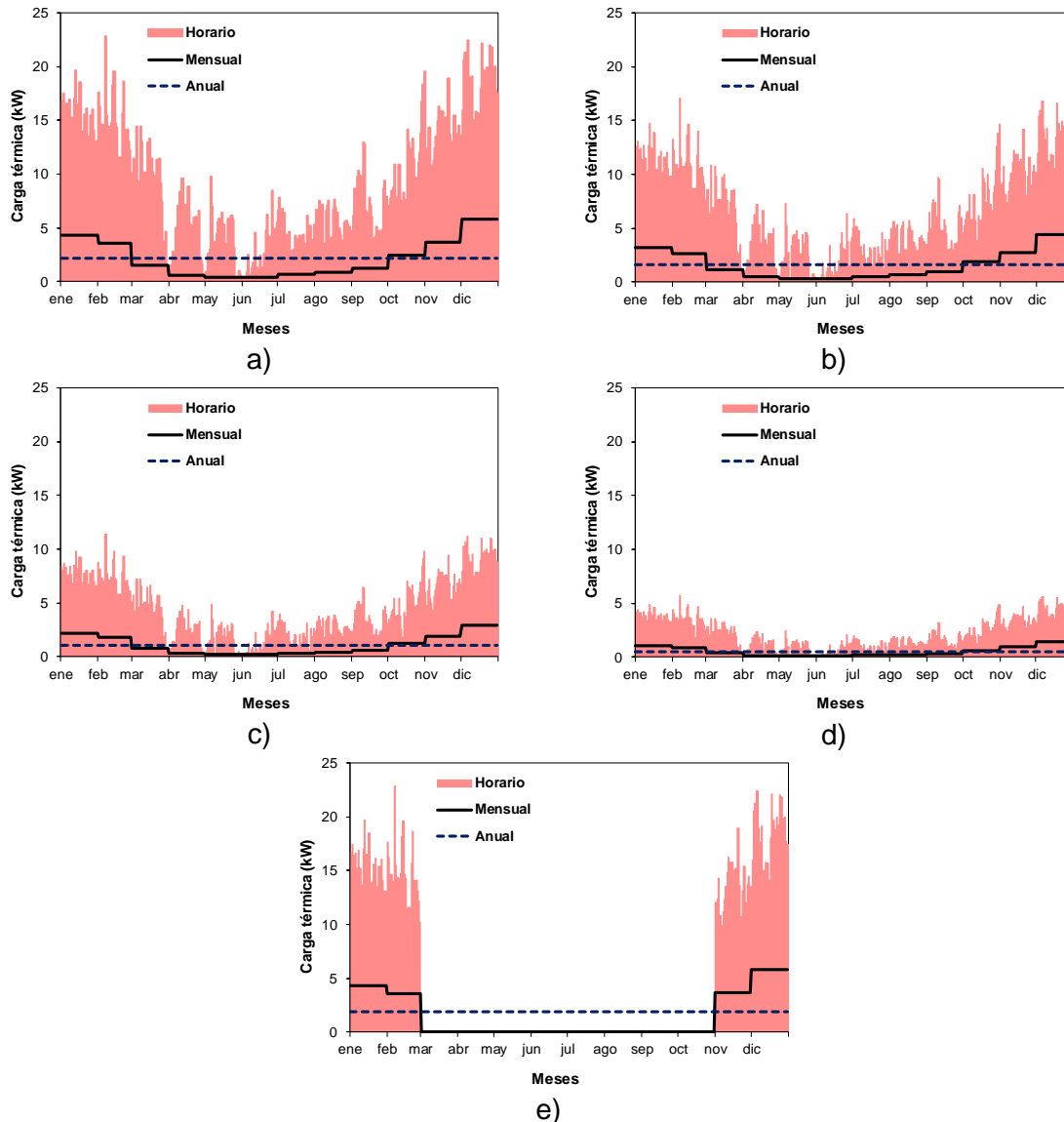


Figura 3.9 Modos de operación evaluados para el funcionamiento de las pilas de energía: a) Modo 1 – carga total, b) Modo 2 – carga reducida del 75%, c) Modo 2 – carga reducida del 50%, d) Modo 2 – carga reducida del 25%, y e) Modo 3 – carga base.

En las Tablas 3.2 y 3.3 se presentan un resumen de las cargas térmicas máximas horarias, promedios mensuales y promedios anuales para cada modo de operación evaluados.

Tabla 3.2 Resumen de cargas térmicas máxima horaria y promedio anual para los diferentes modos de operación evaluados

Modo de operación		Cargas térmicas (kW)	
		Máxima Horaria	Promedio anual
Modo 1 – Carga total		17.73	2.203
Modo 2 – Carga reducida	75%	13.30	1.652
	50%	8.87	1.101
	25%	4.43	0.55
Modo 3 – Carga base		17.73	1.48

Tabla 3.3 Resumen de cargas térmicas mensuales con respecto al porcentaje de demanda energética

Mes	Carga térmica promedio mensual (kW)				
	Modo 1 – Carga total	Modo 2 – Carga reducida			Modo 3 – Carga base
		75%	50%	25%	
Enero	4.45	3.34	2.23	1.11	4.45
Febrero	3.63	2.72	1.81	0.91	3.63
Marzo	1.58	1.19	0.79	0.40	
Abril	0.63	0.47	0.32	0.16	
Mayo	0.44	0.33	0.22	0.11	
Junio	0.41	0.31	0.20	0.10	
Julio	0.70	0.53	0.35	0.18	
Agosto	0.88	0.66	0.44	0.22	
Septiembre	1.30	0.98	0.65	0.33	
Octubre	2.57	1.92	1.28	0.64	
Noviembre	3.83	2.87	1.92	0.96	3.83
Diciembre	6.06	4.54	3.03	1.51	6.06

Nota: En rojo se señala a propósito el mes de diseño.

3.4.3. Parámetros utilizados en los cálculos

La Tabla 3.4 presenta los parámetros utilizados para la determinación de las longitudes requeridas de pilas de energía para las diferentes configuraciones de tuberías y modos de operación considerados. Para la configuración de los bucles se consideró tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) con una relación de dimensiones (RD) de 11, con un diámetro exterior (d_o) de 3.34 cm y un diámetro interior (d_i) de 2.54 cm. Para todas las configuraciones de bucles se utilizó un recubrimiento de 5 cm.

Como fluido de circulación dentro de las tuberías se asumió agua con una tasa de flujo de 18.93 l min^{-1} (5 gpm), que es un valor típico de trabajo para bombas de calor geotérmico (Kavanaugh y Rafferty, 2014). La conductividad térmica (λ), difusividad térmica (α) y la temperatura inicial (T_0) del suelo se obtuvieron con base en los resultados de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) descrito en el apartado “3.2.3. Propiedades térmicas del suelo”. Las propiedades de las tuberías de PEAD, agua y concreto de las pilas corresponden a valores típicos para estos materiales (Kavanaugh y Rafferty, 2014; Jensen-Page *et al.*, 2019; López-Acosta y Barba-Galdámez, 2022).

Para la bomba de calor, considerada de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante, en condiciones típicas de funcionamiento, la temperatura de entrada del fluido (ELT) es $5 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura de salida del fluido (LLT) es $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$. Para estas temperaturas, el Coeficiente de Rendimiento (COP) es aproximadamente 4.46.

Tabla 3.4 Parámetros considerados para el diseño térmico

Elemento	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Suelo	Conductividad térmica	λ	1.6	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
	Difusividad térmica	α	1.4×10^{-6}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	Temperatura inicial	T_0	18.8	$^\circ\text{C}$
Tuberías (PEAD)	Radio externo	r_o	0.0165	m
	Radio interno	r_i	0.013	m
	Conductividad térmica	λ_p	0.43	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Número de tuberías	n	2, 4, 6, 8	-
Agua	Densidad	ρ_w	998	kg m^{-3}
	Conductividad térmica	λ_w	0.58	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica	$C_{s,w}$	4185.5	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
	Viscosidad cinemática	ν	1×10^{-3}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
	Viscosidad dinámica	μ	1.011×10^{-6}	Pa s^{-1}
	Tasa de flujo	F	18.93	l min^{-1}
	Velocidad de flujo	\bar{v}	0.594	m s^{-1}
Pila (Concreto)	Densidad	ρ_b	2400	kg m^{-3}
	Conductividad térmica	λ_b	0.8	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica	$C_{s,b}$	4100	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Bomba de calor	Coeficiente de rendimiento	COP	4.46	-
	Temperatura de entrada	ELT	5	$^\circ\text{C}$
	Temperatura de salida	LLT	1.8	$^\circ\text{C}$

3.5. Diseño térmico de las pilas de energía del Proyecto C73

3.5.1. Determinación de la resistencia térmica de las pilas de energía

Para determinar la resistencia térmica de las pilas de energía R_b se utilizó el método propuesto por Claesson y Javed (2020) descrito en el apartado “2.8.1. Determinación de la resistencia térmica del intercambiador de calor”. En la Tabla

3.5 se presentan los resultados para las diferentes configuraciones de bucles para las pilas de energía de 0.80 y 1.0 m de diámetro.

Tabla 3.5 Resistencias térmicas calculadas para las distintas configuraciones de tuberías

Diámetro (m)	Configuración de tuberías	Componentes de la resistencia térmica			R_b (mKW ⁻¹)
		$R_{p,conv}$ (mKW ⁻¹)	$R_{p,cond}$ (mKW ⁻¹)	R_c (mKW ⁻¹)	
0.80	A – 1 bucle	0.001	0.046	0.244	0.292
	B – 2 bucles	0.001	0.023	0.112	0.136
	C – 3 bucles	0.000	0.015	0.075	0.091
	D – 4 bucles	0.000	0.012	0.059	0.071
1.00	A – 1 bucle	0.001	0.046	0.256	0.304
	B – 2 bucles	0.001	0.023	0.115	0.139
	C – 3 bucles	0.000	0.015	0.075	0.091
	D – 4 bucles	0.000	0.012	0.057	0.069

Nota: $R_{p,conv}$ = resistencia térmica por convección de las tuberías, $R_{p,cond}$ = resistencia térmica por conducción de las tuberías, R_c = resistencia térmica por conducción dentro de la pila de energía.

Los resultados muestran que la resistencia térmica (R_b) varía entre 0.061 y 0.276 $Mk w^{-1}$. Estos valores son similares a los reportados en Loveridge *et al.* (2013). En dicha investigación se obtuvo una serie de rangos típicos de resistencia térmica R_b evaluados en pilas de energía con distintos diámetros (Figura 3.10) obteniendo un rango de 0.10 a 0.13 mKW^{-1} para pilas de cuatro tuberías, aproximadamente 0.8 mKW^{-1} para pilas de energía con seis tuberías, y en un rango de 0.05 a 0.06 mKW^{-1} para pilas de energía con ocho tuberías.

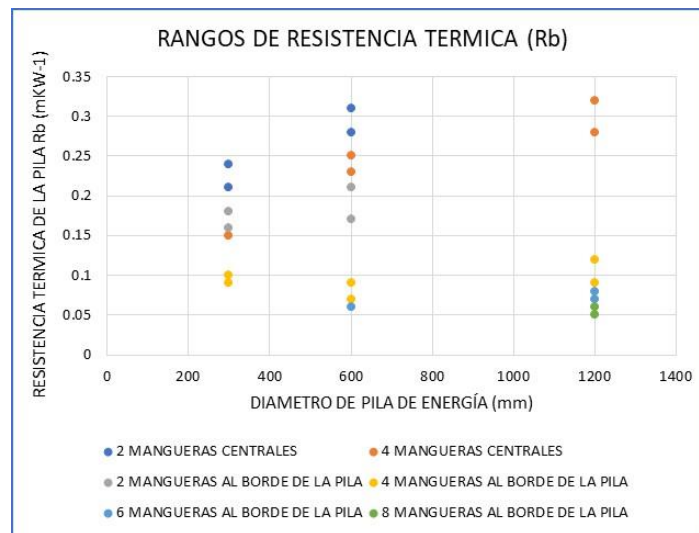


Figura 3.10 Rangos de resistencia térmica R_b para distintas configuraciones de tuberías en las pilas de energía (adaptado de Loveridge *et al.*, 2012).

3.5.2. Penalización térmica

De forma conservadora, se decidió calcular la penalización térmica considerando la menor separación entre las pilas de energía (8.74 m, Figura 3.6). Así, se asume que las pilas de energía tienen la capacidad de transferir calor libremente a una distancia máxima de aproximadamente 4.3 m. En la Tabla 3.6 se muestran los parámetros que conforman el cálculo para la obtención de la penalización por temperatura de las pilas de energía. En general, se requirieron de 13 cilindros huecos, el último con un radio exterior máximo de 30 m.

Tabla 3.6 Obtención de parámetros para el cálculo de penalización por temperatura T_p

N°	r_i (m)	r_o (m)	r_{medio} (m)	Volumen del cilindro hueco (m^3)	X	$I(X)$
1	4	6	5	310	0.12	1.88
2	6	8	7	434	0.17	1.55
3	8	10	9	558	0.21	1.31
4	10	12	11	682	0.26	1.11
5	12	14	13	806	0.31	0.95
6	14	16	15	930	0.36	0.81
7	16	18	17	1054	0.40	0.69
8	18	20	19	1178	0.45	0.58
9	20	22	21	1302	0.50	0.49
10	22	24	23	1426	0.55	0.40
11	24	26	25	1550	0.59	0.32
12	26	28	27	1674	0.64	0.24
13	28	30	29	1798	0.69	0.17

Posteriormente, se determinó la penalización por temperatura T_p utilizando las Ecs. 2.46 y 2.47. Para el caso de estudio se tienen 4 pilas de energía de esquina ($N_{esquina}$) y 2 pilas de energía de lado (N_{lado}). En la Tabla 3.7 se presentan los valores de carga térmica (Q_y) y las penalizaciones térmicas (T_{p1} y T_p) que corresponden a cada modo de operación evaluado en esta tesis. De estos resultados se advierte que los valores de temperatura se reducen conforme disminuye la demanda térmica.

Tabla 3.7 Valores de Penalización por temperatura T_p según la demanda térmica

Modo de operación	Carga térmica (kW)	Penalización térmica (°C)	
		T_{p1}	T_p
Modo 1 – Carga total	2.20	54.27	26.26
Modo 2 – Carga reducida	75 %	40.70	19.70
	50 %	27.13	13.13
	25 %	13.57	6.57
Modo 3 – Carga base	1.48	36.50	17.66

3.5.3. Determinación de la longitud de pila

Finalmente, utilizando los parámetros térmicos del suelo calculados previamente y los valores de penalización por temperatura T_p , se determinan las longitudes de pila de energía, los cuales se presentan en las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10.

Tabla 3.8 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 1 – Carga total para diferentes configuraciones de tuberías

Diámetro de pila (m)	Configuración de tuberías	Cargas térmicas (kW)			Resistencias térmicas (mKW ⁻¹)				L (m)
		Q_y	Q_m	Q_h	$R_{g,y}$	$R_{g,m}$	$R_{g,h}$	R_b	
0.8	A – 1 bucle	2.20	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.292	-676.27
	B – 2 bucles	2.20	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.136	-421.52
	C – 3 bucles	2.20	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.091	-348.04
	D – 4 bucles	2.20	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.071	-315.38
1.0	A – 1 bucle	2.20	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.304	-677.54
	B – 2 bucles	2.20	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.139	-408.09
	C – 3 bucles	2.20	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.091	-329.71
	D – 4 bucles	2.20	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.069	-293.78

Tabla 3.9 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 2 – Carga reducida para diferentes configuraciones de tuberías

Diámetro de pila (m)	Configuración de tuberías	Cargas térmicas (kW)			Resistencias térmicas (mKW ⁻¹)				L (m)
		Q_y	Q_m	Q_h	$R_{g,y}$	$R_{g,m}$	$R_{g,h}$	R_b	
ESCALA 75%									
0.8	A – 1 bucle	1.65	4.54	13.30	0.232	0.156	0.040	0.292	-1280.8
	B – 2 bucles	1.65	4.54	13.30	0.232	0.156	0.040	0.136	-798.26
	C – 3 bucles	1.65	4.54	13.30	0.232	0.156	0.040	0.091	-659.06
	D – 4 bucles	1.65	4.54	13.30	0.232	0.156	0.040	0.071	-597.20
1.0	A – 1 bucle	1.65	4.54	13.30	0.231	0.144	0.033	0.304	-1283.2
	B – 2 bucles	1.65	4.54	13.30	0.231	0.144	0.033	0.139	-772.83
	C – 3 bucles	1.65	4.54	13.30	0.231	0.144	0.033	0.091	-624.36
	D – 4 bucles	1.65	4.54	13.30	0.231	0.144	0.033	0.069	-556.31
ESCALA 50%									
0.8	A – 1 bucle	1.10	3.03	8.87	0.232	0.156	0.040	0.292	1617.68
	B – 2 bucles	1.10	3.03	8.87	0.232	0.156	0.040	0.136	1008.31
	C – 3 bucles	1.10	3.03	8.87	0.232	0.156	0.040	0.091	832.52
	D – 4 bucles	1.10	3.03	8.87	0.232	0.156	0.040	0.071	754.40
1.0	A – 1 bucle	1.10	3.03	8.87	0.231	0.144	0.033	0.304	1620.71
	B – 2 bucles	1.10	3.03	8.87	0.231	0.144	0.033	0.139	976.18
	C – 3 bucles	1.10	3.03	8.87	0.231	0.144	0.033	0.091	788.68
	D – 4 bucles	1.10	3.03	8.87	0.231	0.144	0.033	0.069	702.74
ESCALA 25%									
0.8	A – 1 bucle	0.55	1.51	4.43	0.232	0.156	0.040	0.292	207.85
	B – 2 bucles	0.55	1.51	4.43	0.232	0.156	0.040	0.136	129.52
	C – 3 bucles	0.55	1.51	4.43	0.232	0.156	0.040	0.091	106.92

	D – 4 bucles	0.55	1.51	4.43	0.232	0.156	0.040	0.071	96.88
1.0	A – 1 bucle	0.55	1.51	4.43	0.231	0.144	0.033	0.304	208.24
	B – 2 bucles	0.55	1.51	4.43	0.231	0.144	0.033	0.139	125.39
	C – 3 bucles	0.55	1.51	4.43	0.231	0.144	0.033	0.091	101.29
	D – 4 bucles	0.55	1.51	4.43	0.231	0.144	0.033	0.069	90.25

Tabla 3.10 Resultados de la longitud de pila requeridas para Modo de operación 3 – Carga base para diferentes configuraciones de tuberías

Diámetro de pila (m)	Configuración de tuberías	Cargas térmicas (kW)			Resistencias térmicas (mKW ⁻¹)				L (m)
		Q _y	Q _m	Q _h	R _{g,y}	R _{g,m}	R _{g,h}	R _b	
0.8	A – 1 bucle	1.48	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.292	-3176.0
	B – 2 bucles	1.48	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.136	-1951.8
	C – 3 bucles	1.48	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.091	-1596.7
	D – 4 bucles	1.48	6.06	17.73	0.232	0.156	0.040	0.071	-1441.8
1.0	A – 1 bucle	1.48	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.304	-3182.4
	B – 2 bucles	1.48	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.139	-1887.6
	C – 3 bucles	1.48	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.091	-1510.9
	D – 4 bucles	1.48	6.06	17.73	0.231	0.144	0.033	0.069	-1338.3

Los análisis efectuados con el método de la ASHRAE (Tabla 3.8, 3.9 y 3.10) señalan que se requerirían 702.74 m de pilas de energía (cuatro bucles y 1 m de diámetro) para abastecer el 50% de las cargas térmicas del proyecto Residencia C73. Este valor es aproximadamente 7.8 veces superior a la longitud de pilas de energía disponibles. Dado que el sistema geotérmico (pilas de energía) es incapaz de satisfacer la totalidad de la demanda de energía de la edificación, resulta conveniente optar por un sistema mixto, en el que un porcentaje de la carga térmica sea provisto por las pilas de energía y el resto por un sistema de calefacción convencional (segundo modo de operación: carga reducida).

Los resultados obtenidos con carga reducida indican que 90.25 m de pilas de energía permiten satisfacer 25% de las cargas térmicas demandadas por la edificación. Lo anterior, corresponde a una carga térmica máxima de 4.43 kW, una carga térmica mensual promedio de 1.51 kW y una carga térmica anual promedio de 0.55 kW. Así, el sistema geotérmico (pilas de energía) de este proyecto puede utilizarse satisfactoriamente para acondicionar zonas particulares de la edificación, como la recámara principal o la sala de reuniones.

Cabe mencionar que en los casos de Modo de operación 1 (Carga total para diferentes configuraciones de tuberías), Modo de Operación 2 (Carga al 75%) y Modo de Operación 3 (Carga base para diferentes configuraciones de tuberías) la penalización de la temperatura (Corrección de la temperatura del suelo inalterado por interferencias térmicas entre pozos) es mayor que la temperatura inicial del suelo, lo cual arroja valores negativos en la longitud de la pila, con lo que se descartan estas opciones.

4. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS PILAS DE ENERGÍA EN EL SITIO DE ESTUDIO

El proceso constructivo de las pilas de energía del *Proyecto C73* se realizó bajo los fundamentos y lineamientos dados por la International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA, 2012), la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR, 2012) y el Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) (CFMS-SYNTEC-SOFFON-SFNTP, 2017). En general, el procedimiento comienza con la construcción del sistema primario (pilas de energía), continúa con la instalación de los colectores, la superestructura que incluye la sala de máquinas y el sistema secundario, y concluye con la conexión del sistema primario al sistema secundario y la bomba de calor. A continuación, se detallan las características finales y el proceso constructivo de las pilas de energía y del circuito secundario utilizados en el *Proyecto C73*.

4.1. Características finales de las pilas de energía

4.1.1. Materiales

Para la conformación del intercambiador de calor se utilizaron tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PEAD). Las tuberías contaron con un diámetro nominal de 1" ($d_f=2.54$ cm) con una relación de dimensiones (RD) de 11, de acuerdo con lo especificado en la norma NMX- E-018-CNCP- 2012.

4.1.2. Configuración final del sistema de tuberías y pilas de energía

Siguiendo las consideraciones establecidas en el apartado “3.3.1. Sistema de cimentación”, se decidió activar térmicamente únicamente seis de las ocho pilas (Figura 3.6). El sistema de tuberías se conformó con cuatro bucles en U conectados en serie, con una separación entre tuberías de aproximadamente 25 cm (Figura 4.1). Para evitar problemas de obstrucción en las tuberías, los bucles de la sonda geotérmica (sistema de tuberías) se construyeron con codos de PEAD a 90° termo-soldables. Asimismo, se dejó una separación mínima de 25 cm entre la base del refuerzo y la parte inferior de los bucles, y una distancia mínima de 20 cm entre el inicio del refuerzo y los bucles ubicados cerca de la cabeza de la pila de energía (Figura 4.2), con el objetivo de evitar daños en los bucles durante el proceso de instalación del armado y el descabezado de la pila de energía.

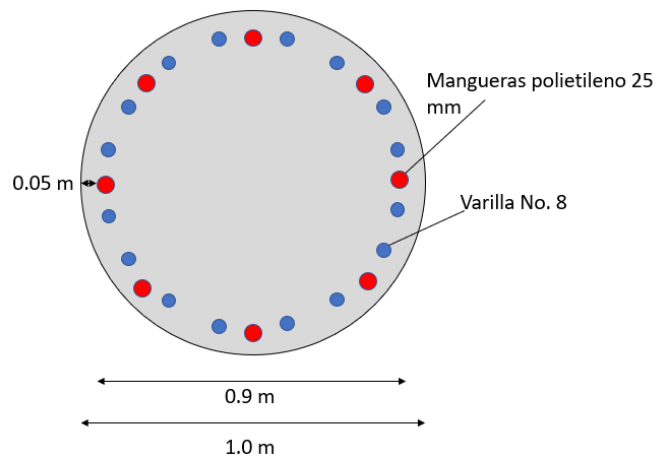


Figura 4.1. Detalle transversal de la pila

Para la conformación del armado se emplearon 16 varillas del No 8 para el refuerzo longitudinal y varillas del No. 4 para estribos. La separación entre estribos fue de 15 cm en los primeros 5 m de longitud y en el resto 1.20 m aproximadamente.

4.2. Proceso constructivo

4.2.1. Circuito primario

La primera etapa del proceso constructivo consiste en la conformación del sistema cerrado de tuberías. Para ello, se cortaron las tuberías de HDPE a las longitudes requeridas y se unieron por medio de termofusión a tope (*butt fusion*). Para la construcción de bucles en U, se utilizaron codos termo-soldables al final e inicio de la pila.

A continuación, se fijaron las tuberías al refuerzo transversal de la pila por medio de amarres metálicos (Figuras 4.3a y b). Para evitar una deformación excesiva de

las tuberías, los amarres se colocaron con una separación máxima de 1 m en el cuerpo de la pila y de 25 cm en el primer y último metro del bucle. Las tuberías se ubicaron con una distancia mínima de $4D_{max}$ respecto a los refuerzos longitudinales, donde D_{max} es el tamaño máximo del agregado del concreto. Fijadas las tuberías, se purgó el sistema circulando agua en ambas direcciones a una velocidad mínima de 0.61 m/s. Posteriormente, se efectuó una prueba de presión en el circuito de tuberías para descartar la presencia de fugas en las juntas. La prueba se desarrolló con base en los requerimientos establecidos en la norma ASTM F2164-18 (2018) con una presión máxima de 700 kPa (Figuras 4.3c y d). Concluida la prueba, se redujo la presión en los bucles hasta 400 kPa, la cual se mantuvo hasta la conexión final con el circuito secundario.

Simultáneamente, se efectuó la perforación de la pila de energía. Este procedimiento se desarrolló con ayuda de una perforadora rotatoria con hélice continua para el estrato de relleno y el barril de perforación para el estrato firme del suelo sin requerir ademe (Figura 4.2).

Finalmente, se procedió a la colocación del armado en el terreno y el colado de la pila. El armado junto con las tuberías se izó por medio de una grúa y colocó en una perforación sin revestimiento (Figuras 4.3 f y g). El colado se efectuó utilizando un tubo tremie para evitar segregación excesiva y minimizar cualquier daño potencial a los bucles (Figura 4.2h). Se utilizó concreto con un tamaño máximo del agregado de 13 mm y un revenimiento de 18 a 20 cm.

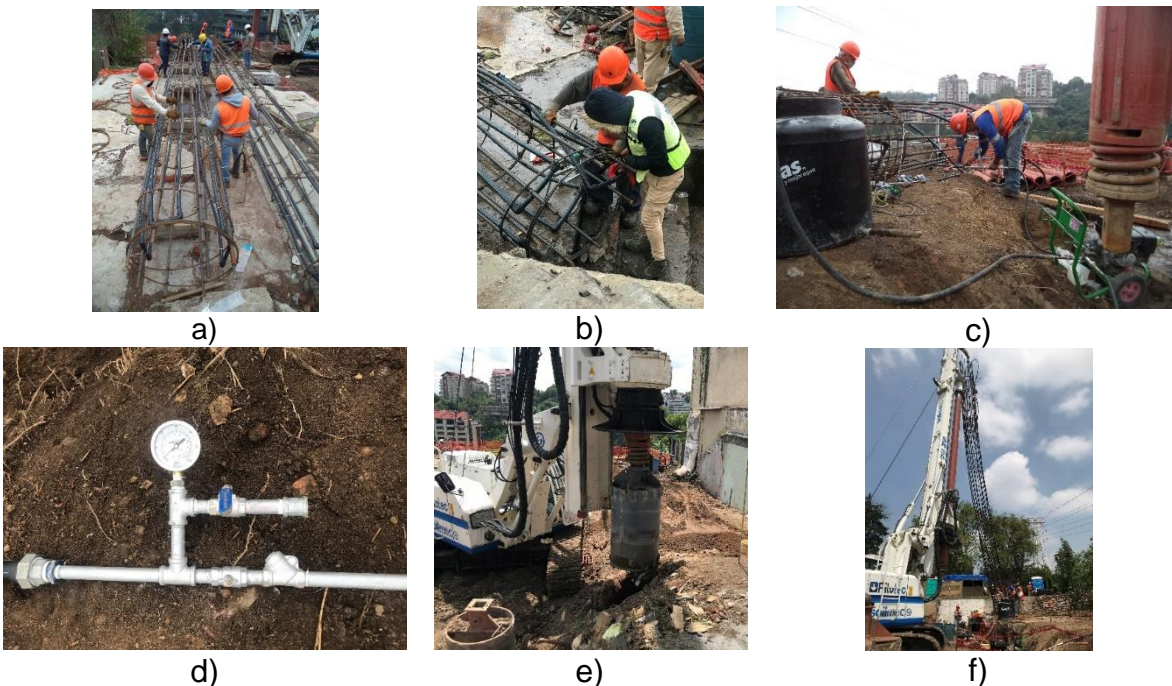




Figura 4.2 Proceso constructivo de armado de las pilas de energía: a) armado de la pila de energía, b) colocación de tuberías con termofusión, d) prueba de presión en tuberías, e) manómetro empleado en las pruebas de presión, e) perforación en el suelo, f) hizaje del armado, g) colocación dentro de la perforación y h) colado de pila.

4.2.2. Colectores y sala de máquinas

El circuito primario conformado por las 6 pilas de energía (Figura 4.3) extiende las tuberías provenientes de los bucles internos de las pilas hacia la bomba de calor que se ubica en la sala de máquinas. La bomba de calor recibe el flujo de agua y transfiere la energía a través de los colectores de cobre del circuito primario y la transfiere al circuito secundario y a toda la estructura de la edificación mediante una red de tuberías y válvulas de regulación (Figura 4.3).

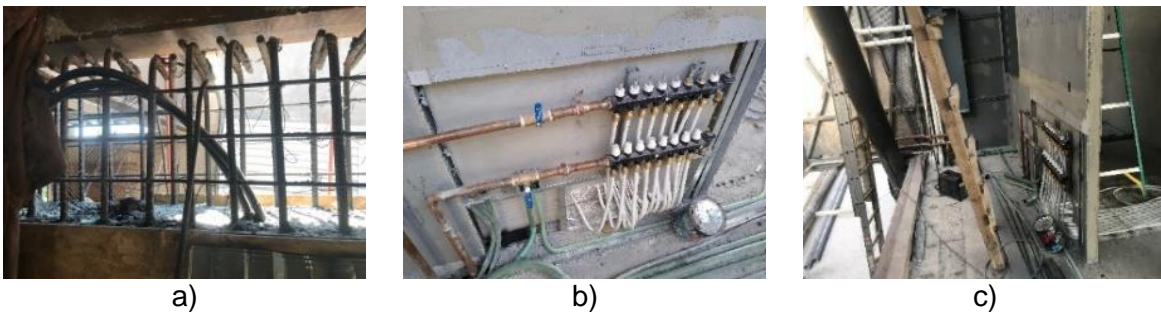


Figura 4.3. a) Tuberías provenientes de las pilas de energía, b) Unidades de distribución de tuberías para el piso radiante (colectores) y c) Sitio donde se conectará bomba de calor (sala de máquinas)

La sala de máquinas tiene un papel muy importante en la transferencia de calor del suelo hacia la estructura. A través de este espacio y de la bomba de calor, es posible regular el flujo de energía a modo de optimizar su aprovechamiento, según la hora y el día de la semana.

4.2.3. Sistema secundario (Piso radiante)

El circuito secundario comienza en la bomba de calor y continúa a través de una red que se distribuye dentro de losas (piso radiante) y muros de recámaras y sala de reuniones. El sistema consiste en tuberías de cobre y tuberías tipo multicapa

con alma de aluminio de 13 mm de diámetro. En las tuberías se realizan pruebas de purgado y presión para evitar posibles fugas (Figura 4.4).

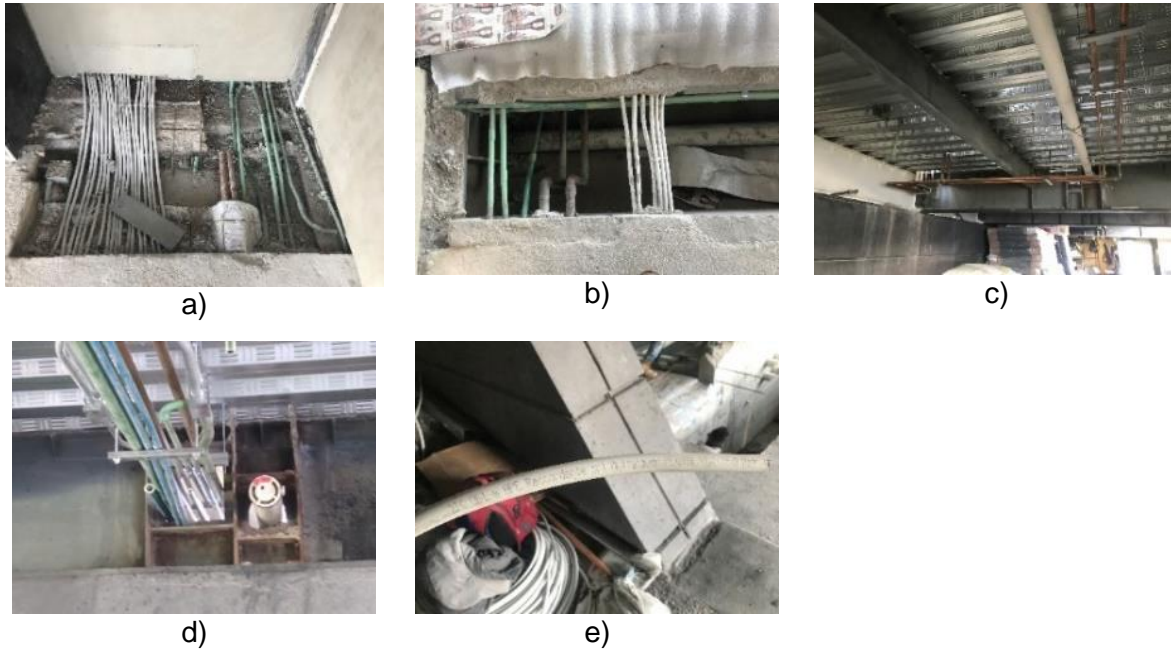


Figura 4.4. Sistema secundario: a) y b) líneas de tubería de cobre unidas a las unidades de distribución, c) y d) líneas de distribución de cobre para entrada y salida a la bomba de calor y e) detalle de manguera multicapa empleada en piso radiante

La tubería de cobre de 38 mm de diámetro se encuentra conectada desde la bomba de calor hacia las dos unidades de distribución que cuentan con ocho válvulas de entrada de flujo y ocho más de salida. Las mangueras térmicas se distribuyen en cuadrículas de 15 x 15 cm, unidas mediante coples y conexiones en toda el área de la losa.

5. CONCLUSIONES

Las pilas de energía son una de las técnicas más prometedoras a nivel mundial para responder a la creciente demanda energética para la climatización de edificaciones. Pese a sus múltiples beneficios y aunque su uso se ha extendido en diversos países durante los últimos años, actualmente no se tienen registros de implementación de esta tecnología en México.

El objetivo principal de esta tesis fue realizar el diseño térmico de una cimentación a base de pilas de energía utilizando la metodología para diseño térmico de la ASHRAE. Con este fin, después de una breve introducción al tema dada en el Capítulo 1, en el Capítulo 2 se presentaron los lineamientos para el diseño térmico de este tipo de estructuras, junto con sus principales hipótesis y limitaciones. Además, se expusieron diversos métodos de análisis para evaluar la transferencia de calor entre las pilas de energía y el suelo, como el modelo de fuente lineal infinita, fuente lineal finita y cilíndrica infinita. Por otra parte, se describió el procedimiento implementado para el dimensionamiento de pilas de energía, basado en la metodología de la ASHRAE. Este método es de gran utilidad cuando se cuenta con información sobre las cargas térmicas durante todo el año, lo cual permite determinar la demanda de energía de la edificación, el arreglo de tuberías, dimensiones y características de la pila de energía que mejor se adapten a las condiciones del sitio.

En el Capítulo 3 se realizó el diseño térmico de un sistema de cimentación a base de pilas de energía que forma parte del Proyecto C73, siendo la primera edificación en México equipada con esta innovadora tecnología para el acondicionamiento de espacios. Inicialmente, se presentaron las características del sitio de estudio y se describieron las características generales del sistema de cimentación. Posteriormente, se definieron las consideraciones generales para el diseño y parámetros utilizados para la determinación de las longitudes requeridas de las pilas de energía para este proyecto. Con el objetivo de identificar la máxima energía que las pilas de energía pueden proveer a la edificación, se efectuaron análisis con el método de la ASHRAE para cuatro configuraciones de bucles (uno, dos, tres y cuatro bucles en U conectados en serie) y cinco modos de operación (carga térmica total, carga reducida al 75, 50 y 25%, y carga base en los meses de máxima demanda).

En el Capítulo 4 se describió el procedimiento constructivo de las pilas de energía implementadas en el Proyecto C73. Se detalló la instalación del sistema primario, desde la perforación hasta el colado de las pilas. Enseguida se exhibieron los principales aspectos de la sala de máquinas, los colectores y su importancia. Finalmente, se presentó la construcción del sistema secundario y sus principales características.

Las conclusiones generales de los temas antes mencionados se presentan a continuación.

- Al comparar los resultados obtenidos con el Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en el sitio de estudio (López Acosta *et al.*, 2022) y los valores presentados en la literatura internacional (Loveridge *et al.*, 2013), se demostró que el método propuesto por Claesson y Javed (2020) es adecuado para estimar la resistencia térmica de las pilas de energía.
- Con base en los análisis efectuados utilizando el método de la ASHRAE, se identificó que el número de pilas de energía del sistema de cimentación del Proyecto C73 (6 pilas de 0.8 y 1.0 m de diámetro, proporcionan un total de 92 m de intercambiadores de calor) es suficiente para abastecer el 100% de la carga térmica requerida por la edificación.
- De los análisis efectuados se determinó que las configuraciones de tuberías más idóneas para las pilas de energía son los arreglos de tres y cuatro bucles en U conectados en serie. Asimismo, se identificó que el modo de operación más adecuado es el de carga al 25%, con diámetro de 1 m y configuración de 4 bucles en U conectados en serie. Con lo anterior, es posible satisfacer una carga térmica máxima de 4.43 kW, una carga térmica mensual promedio de 1.51 kW y una carga térmica anual promedio de 0.55

kW. Así, el sistema de pilas de energía puede utilizarse satisfactoriamente para acondicionar zonas particulares de la edificación, como la recámara principal o la sala de reuniones.

Estos resultados son alentadores y demuestran la factibilidad de implementar este tipo de tecnología en el contexto mexicano. Se espera que el Proyecto de vanguardia C73 represente un punto de partida para la utilización y difusión de pilas de energía en el país.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, S.L, Olgun, C.G. & Martin, J.R. (2011). *Design and operational considerations of geothermal energy piles*. Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. ASCE Geotechnical Special Publication, 211, 450-459.
- Abdelaziz, S. L., Olgun, C. G., & Martin II, J. R. (2015). Equivalent energy wave for long-term analysis of ground coupled heat exchangers. *Geothermics*, 53, 67–84.
- Abuel-Naga, H., R. R. (2015). Energy Piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2, 195-210
- Akrouch, G.A., Sánchez, M. & Briaud, J.L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta Geotechnica*, 9, 399–412.
- Asociacion Tecnica Espanola de Climatizacion y Refrigeracion – ATECYR. (2012). *Guía Técnica de Diseño de Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid.
- ASTM International (2014). *D5334-14 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2018). *F2164-18 Standard Practice for Field Leak Testing of Polyethylene (PE) and Crosslinked Polyethylene (PEX) Pressure Piping Systems Using Hydrostatic Pressure*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2019). *C177-19 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Banks, D. (2012). From Fourier to Darcy, from Carslaw to Theis: the analogies between the subsurface behaviour of water and heat. *Italian Journal of Groundwater*, AS03013, 9-18.
- Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R.M., Wang, B. & Ranjith, P.G. (2013). *Thermal conductivity of soils and rocks from the 399 Melbourne (Australia) region*. *Engineering Geology*, 164, 131–138.
- Bernier, M.A. (2001). Ground-coupled heat pump system simulation. *ASHRAE Transactions*, 107 (1), 605-616.

- Bernier, M.A., Pinel, P., Labib, R. & Paillot, R. (2004). A multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulation of GCHP systems. *International Journal of Heat, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigeration Research*, 10, 471-488.
- Bourne-Webb, P. J., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., & Loveridge, F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 402–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.046>
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.
- Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959). Conduction of Heat in Solids. Segunda edición, *Clarendon Press*, Oxford.
- CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP (2017) Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques.
- Claesson J., & Javed, S. (2020). Explicit Multipole Formula for the Local Thermal Resistance in an Energy Pile—The Line-Source Approximation. *Energies*, 13(20), 5445.
- Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2006). Termodinámica. *McGraw-Hill*, quinta edición, México.
- Cooper, L.Y. (1976). Heating of a cylindrical cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19, 575-577.
- De Moel M., Bach, P.M., Bouazza, A., Singh, R.M. & Sun, J.L.O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2683-2696.
- Eklöf, C. & Gehlin, S. (1996). TED-a mobile equipment for thermal response test: testing and evaluation. *Tesis de maestría en Luleå University of Technology, Suecia*.
- Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes. *Tesis de doctorado en Lund University, Suecia*.
- Gautschi, W. & Cahill, W.F. (1964). *Exponential integral and related functions*. En: Abramowitz, M. & Stegun, I. (Eds.), *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. National Bureau of Standards, Washington, D.C.

Gao, J., Liu, J., Li, K.S. & Yang, J. (2008). Thermal Performance and ground temperature of vertical pile- foundation heat ex changers: a case study. *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18), 2295-2304.

Gobierno de la Ciudad de México (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones - NTCDCC*. Gaceta Oficial de la Ciudad México, Ciudad de México, México.

Ground Source Heat Pump Association (2012). Thermal pile design, installation and materials standards. Ground Source Heat Pump Association, Milton Keynes, Reino Unido.

Hellstrom, G. (1991). Ground heat storage – thermal analysis of duct storage systems. *Tesis de doctorado en Lund University, Suecia*.

IGSHPA - International Ground Source Heat Pump Association (2017). *Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems. Design and Installation Standards*.

Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948). Theory of ground pipe heat source for the heat pump. *Heating Piping and Air Conditioning*, 20, 119-122.

Ingersoll, L.R., O.J. Zobel & A.C. Ingersoll (1954). Heat Conduction: With Engineering and Geological Applications. Segunda edición, *McGraw Hill*, Nueva York.

INGGEOTEC (2020). *Exploración Presiométrica Reporte Final. Bosques de Chihuahua 73, Ciudad de México*.

Jensen-Page, L., Loveridge, F., & Narsilio, G. A. (2019). Thermal response testing of large diameter energy piles. *Energies*, 12(14), 1–25.

Kavanaugh, S., & Rafferty, K. (2014). Geothermal Heating and Cooling, Design of Ground-Source, Heat Pump Systems. *ASHRAE*.

Laloui, L. & Rotta-Loria, A. (2019). Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application. *Academic Press*.

Lamarche, L. & Beauchamp, B. (2007). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188-198

Li, M. & Lai, A. C. (2015). Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. *Applied Energy*, 151, 178- 191

López-Acosta N.P., Barba-Galdámez D.F., & Sánchez, M. (2017). *Pilas de energía. Explotación de recursos geotérmicos a través de las cimentaciones profundas*. En: López-Acosta, N.P. (ed.) 4° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, CDMX, México, 149-162.

López-Acosta, N.P., Zaragoza-Cardiel, A.I. & Barba-Galdámez, D.F. (2021). Determination of Thermal Conductivity Properties of Coastal Soils for GSHPs and Energy Geosturcture Applications in Mexico. *Energies*, 14, 5479. <https://doi.org/10.3390/en14175479>

López-Acosta, N.P., Portillo-Arreguín, D.M., Barba-Galdámez, D.F. & Singh, R.M. (2022). Thermal properties of soft clayey soils from the former Lake Texcoco in Mexico. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100376. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100376>

López-Acosta, N.P., Rivera-Martínez, A.M., y Barba-Galdámez, D.F. (2022). *Construcción y ensayo TRT en la primera pila de energía en México*. En: López-Acosta, N.P. & Martínez-Hernández, E. (eds.) 5° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, CDMX, México, 71-77.

López-Acosta, N.P. y Barba-Galdámez, D.F. (2022) *Diseño térmico preliminar del primer proyecto de pilas de energía en México*. En: López-Acosta, N.P. y Martínez-Hernández, E. (eds.) 5° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, CDMX, México, 43-48.

Loveridge, F. (2012). The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems. *Tesis de doctorado en University of Southampton, Reino Unido*.

Loveridge, F., Powrie, W., & Smith, P. (2013). A review of the design and construction aspects for bored thermal piles. *Ground Engineering*, March 2013, 28-31.

Loveridge, F., & Powrie, W. (2013). Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 166, 178-196.

Loveridge, F., Low, J. & Powrie, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50, 158–168.

Makasis, N., Narsilio, G.A. & Bidarmaghz, A. (2018). A machine learning approached to energy pile design. *Computers and Geotechnics*, 97, 189-203.

McAllister, E. W. (2013). Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solutions to everyday pipeline engineering problems. *Gulf Professional Publishing*.

Meyer, J., Pride, D., O'Toole, J., Craven, C., & Spencer, V. (2011). Ground-Source Heat Pumps in Cold Climates Ground-Source Heat Pumps in Alaska.

Mikhaylova, O., Johnston, I.W. & Narsilio, G.A. (2016). Uncertainties in the design of ground heat exchangers. *Environmental Geotechnics*, 3, 253–264.

Mimouni, T. (2014). Thermomechanical Characterization of Energy Geostructures with Emphasis on Energy Piles. *Tesis de doctorado en Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*.

Philippe, M., Bernier, M. & Marchio, D. (2010). Sizing calculation spreadsheet vertical geothermal borefields. *ASHRAE Journal*, 52(7), 20-28.

Portillo-Arreguín, D.M., López-Acosta, N.P., Barba-Galdámez, D.F. & Sánchez, M. (2018). *Determinación de propiedades térmicas de los suelos a partir de la aguja térmica*. XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, León, Guanajuato, 53 – 60.

Remund, C.P. (1999). Borehole thermal resistance: laboratory and field studies. *ASHRAE Transactions*, 105 (1), 439e445.

Rivera Martínez, A. M. (2021). Diseño e implementación de un equipo de respuesta térmica (TRT) para la determinación de las propiedades térmicas de los suelos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Santoyo, E. & Barragán-Reyes, R.M. (2010). Energía Geotérmica. *Ciencias*, Enero (2010) ,40 – 51.

Shonder, J.A. & Beck, J.V. (1999). Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance. *ASHRAE Transactions*, 106, 843–50.

SIA (Société suisse des ingénieurs et des architectes) (2005). Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. Zurich, Suiza.

Soga, K. & Rui, Y. (2016). *Energy geostructures*. En: Rees, S.J. (Ed.) *Advances in ground-source heat pump systems*, Woodhead Publishing, 185-221.

Spitler, J. D., & Bernier, M. (2016). *Vertical borehole ground heat exchanger design methods*. En: Spitler, J.D. & Bernier, M. (Eds.) *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*.

Suryatriyastuti, M.E., Mroueh, H. & Burlon, S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3344-3354.

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2001). Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems.

Vieira, A., Alberdi-Pagola, M., Christodoulides, P., Javed, S., Loveridge, F., Nguyen, F., Cecinato, F., Maranhã, J., Florides, G., Prodan, I., *et al.* (2017). Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10, 2044.

Winterton, R.H.S. (1998). Where did the Dittus and Boelter equation come from?. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41 (4–5), 809–810.

Yavuzturk, C. & Spitler, J.D. (1999). A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105 (2), 475-485

Zarella, A., De Carli, M. & Galgaro, A. (2013). Thermal performance of two types of energy foundation pile: helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 61(2): 301-310.

Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558–567.

ANEXO I. REPORTE FOTOGRÁFICO CONSTRUCCIÓN DE PILAS DE ENERGÍA

A continuación, se integra un reporte fotográfico mostrando el proceso de armado, montaje y colado de las pilas de energía, así como diversos aspectos del conformado y unión de las mangueras de las pilas hacia los pisos y muros de la edificación del Proyecto C73.

También se presenta el proceso de pruebas de purgado y de presión en las tuberías adosadas al armado de las pilas de energía.



Figura I.1 Maquinaria realizando labores de perforación en sitio.



Figura I.2 Broca de perforación.



Figura I.3 Detalle de la broca de perforación.



Figura I.4 Vista del sitio del Proyecto C73.



Figura I.5 Posicionamiento de la maquinaria de perforación en uno de los puntos donde se alojará una pila.



Figura I.6 pozo excavado para albergar una pila de energía.



Figura I.7 Armado de la pila de energía.



Figura I.8 Habilitado de los bucles de mangueras de polietileno.



Figura I.9 Vista del armado de las mangueras en las pilas de energía.



Figura I.10 Parte inferior de pilas de energía.



Figura I.11 Parte superior de las pilas de energía.



Figura I.12 Parte superior de las pilas de energía.



Figura I.13 Armado de pilas de energía previo a las pruebas de purgado.



Figura I.14 Pegado de las tuberías mediante termofusión.



Figura I.15 Pegado de las tuberías mediante termofusión.



Figura I.16 Vista interior desde la parte inferior de la pila de energía.



Figura I.17 Habilitado pilas de energía.



Figura I.18 Pila de energía.



Figura I.19 Detalle de los estribos en espiral y dentro de ellos las mangueras.



Figura I.20 Habilitado de acero en pilas.



Figura I.21 Inicio de las pruebas de presión y purgado de las mangueras



Figura I.22 Manómetro en operación durante la ejecución de la prueba de purgado



Figura I.23 Manómetro en operación durante la ejecución de la prueba de purgado



Figura I.24 Ejecución de la prueba de purgado



Figura I.25 Equipo durante pruebas de purgado y presión.



Figura I.26 Izaje y montaje del armado de una pila de energía



Figura I.27 Descenso del armado de la pila de energía dentro del pozo



Figura I.28 Descenso del armado de la pila de energía dentro del pozo



Figura I.29 Detalle del armado de la pila de energía



Figura I.30 Preparando equipo para el colado de la pila



Figura I.31 Colocación del embudo para recibir concreto



Figura I.32 Tendido tubular para el paso del concreto a la pila de energía



Figura I.33 Tubería para el colado lista



Figura I.34 Inicio del colado de la pila de energía



Figura I.35 Colado de pila de energía



Figura I.36 Colado de pila de energía



Figura I.37 Colado de pila de energía



Figura I.38 Colado finalizado de pila de energía



Figura I.39 Retiro de las tuberías para colado



Figura I.40 Retiro de las tuberías para colado



Figura I.41 Vista de una pila previo a su colado



Figura I.42 Mangueras saliendo de la pila de energía



Figura I.43 Vista de una pila previo a su colado



Figura I.44 Pila de energía colada y con sus mangueras sobresaliendo del concreto



Figura I.45 Pila convencional colada y con sus mangueras sobresaliendo del concreto



Figura I.46 Habilitado y armado de elementos de unión entre cabezales de pilas



Figura I.47 Habilitado de trabe y dado



Figura I.48 Habilitado de trabe y dado



Figura I.49 Habilitado de muros con acero



Figura I.50 Habilitado de muros



Figura I.51 Habilitado de muros



Figura I.52 Habilitado de muros



Figura I.53 Habilitado de muros



Figura I.54 Habilitado de muros



Figura I.55 Habilitado de muros



Figura I.56 Habilitado de muros



Figura I.57 Habilitado de muros



Figura I.58 Habilitado de muros



Figura I.59 Unión de armado de acero con perfiles



Figura I.60 Detalle de perfil V para soporte



Figura I.61 Vista de los muros habilitados



Figura I.62 Estructura metálica en V lado sur



Figura I.63 Estructura metálica en V lado sur



Figura I.64 Armado de muros



Figura I.65 Armado de muro sobre estructura V



Figura I.66 Armado de muro sobre estructura V



Figura I.67 Mangueras de polietileno sobresaliendo del muro de concreto



Figura I.68 Mangueras de polietileno sobresaliendo del muro de concreto



Figura I.69 Mangueras de polietileno sobresaliendo del muro de concreto



Figura I.70 Mangueras de polietileno sobresaliendo del muro de concreto



Figura I.71 Vista frontal de la techumbre sobre la losa de concreto



Figura I.72 Vista lateral lado norte de la techumbre sobre la losa de concreto

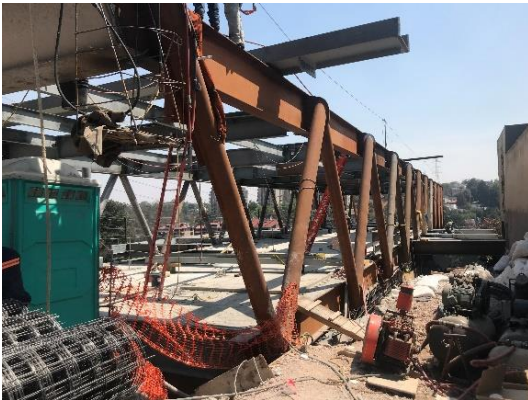


Figura I.73 Vista lateral lado sur de la techumbre sobre la losa de concreto



Figura I.74 Zona de Conexión entre el circuito primario y secundario



Figura I.75 Vista de las mangueras que pasan a través del piso radiante y que provienen del circuito primario



Figura I.76 Vista de las mangueras que pasan a través del piso radiante y que provienen del circuito primario



Figura I.77 Vista de la losa de concreto (piso radiante)



Figura I.78 Zona de Conexión entre el circuito primario y secundario

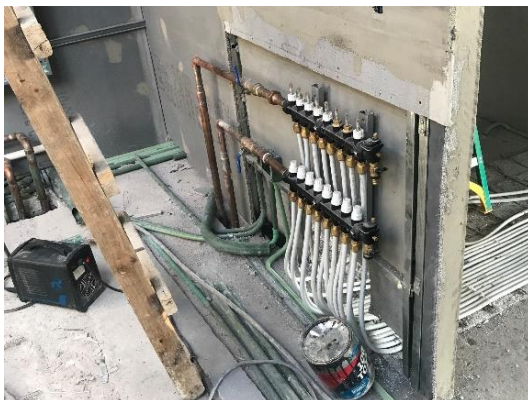


Figura I.79 Zona de Conexión entre el circuito primario y secundario



Figura I.80 Vista de cisterna que contiene mangueras en si interior.



Figura I.81 Detalle de la manguera utilizada para el piso radiante (3/4 pulg. Diámetro)



Figura I.82 Vista de manguera sellada saliendo del muro de concreto



Figura I.83 Vista de las mangueras y tuberías ancladas a muros y debajo de techumbre



Figura I.84 Vista de las mangueras y tuberías ancladas a muros y debajo de techumbre