



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

**CRITERIOS DE DISEÑO TÉRMICO Y CONSTRUCCIÓN PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE PILAS DE ENERGÍA EN MÉXICO**

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

PRESENTA:
ANGEL GERARDO RIVERA LÓPEZ

TUTORA PRINCIPAL
DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: Dr. Rivera Constantino Rigoberto

Secretario: M. en I. Paniagua Zavala Walter Iván

1er. Vocal: Dra. López Acosta Norma Patricia

2do Vocal: Dr. Aviña Jiménez Héctor Miguel

3er Vocal: Dr. Morillón Gálvez David

Lugar donde se realizó la tesis; INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA

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

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Al Instituto de ingeniería por proporcionarme espacio y beca para la conclusión de esta tesis.

Al CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A la Doctora Norma Patricia López Acosta por su paciencia, confianza y apoyo en la elaboración de este trabajo.

A David Barba por su paciencia y apoyo a lo largo de la elaboración de esta tesis.

A mis padres, a mis hermanos, a Alexandra y mis amigos por su apoyo incondicional siempre.

**CRITERIOS DE DISEÑO TÉRMICO Y CONSTRUCCIÓN PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE PILAS DE ENERGÍA EN MÉXICO**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.2. Obtención de los parámetros geotérmicos	12
2.3. Pruebas de carga en pilas de energía.....	14
2.4. Comportamiento termo-mecánico de pilas de energía	15
2.4.1. Efectos geotécnicos	17
2.4.2. Efectos estructurales.....	18
2.5. Arreglos de tuberías intercambiadoras de calor	20
2.6. Clasificación de pilas de energía.....	21
2.6.1. Pila de energía con tubería en U	23
2.6.2. Pila de energía con tubería de dos bucles en U.....	26
2.6.3. Pila de energía con tubería de tres bucles en U	28
2.6.4. Pila de energía con tubería en W.....	30
2.6.5. Pila de energía con tubería helicoidal	32
2.7. Eficiencia de pilas de energía	33
2.8. Soluciones analíticas para el análisis térmico de intercambiadores de calor	33
2.8.1 Fuente lineal infinita	36
2.8.2 Fuente cilíndrica infinita	37
2.8.3 Fuente lineal finita.....	38
2.8.4 Método del manual ASHRAE.....	39
2.9. Análisis costo-beneficio de las pilas de energía	46
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PILAS DE ENERGÍA	50
3.1. Consideraciones en el análisis de intercambio de calor.....	50

3.1.1. Transporte de calor en el suelo.....	50
3.1.2. Transporte de calor dentro de una pila de energía	51
3.1.3. Efectos en el transporte de calor por las condiciones en superficie	51
3.1.4. Interacciones térmicas.....	51
3.1.5. Cargas térmicas.....	51
3.2. Métodos analíticos para el análisis térmico de pilas de energía	52
3.3. Recomendaciones para el procedimiento constructivo de una pila de energía	52
3.3.1. Tuberías intercambiadoras de calor	52
3.3.2. Fijación y posicionamiento de las tuberías.....	54
3.3.3. Pruebas de purgado, presión y flujo.....	56
3.3.4. Procedimiento constructivo de la pila de energía.....	57
3.3.5. Control de calidad en pilas de energía.....	61
3.4. Sistema de aplicación de cargas.....	62
3.5. Instrumentación y sistema de adquisición de datos.....	63
4. CASO DE ESTUDIO	66
4.1. Localización del sitio de estudio	68
4.2. Estratigrafía y propiedades geotérmicas del sitio	69
4.3. Análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor y en la periferia de la pila analizada	72
4.4. Consideraciones del análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila y su periferia.....	72
4.5. Resultados del análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila y su periferia.....	74
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	81
5.1. Conclusiones	81
5.2. Recomendaciones	82
REFERENCIAS	83
ANEXO A. Estado del arte de pruebas de carga y desempeño térmico en pilas de energía en el mundo	91

RESUMEN

Las estructuras termoactivas, en particular las pilas de energía, se vislumbran como una alternativa para abastecer la creciente demanda de energía para el acondicionamiento de espacios. En México, esta tecnología no ha sido utilizada ya que existen algunos desafíos para su implementación. Las principales limitaciones se relacionan con la escasa información que se tiene sobre estos sistemas, la falta de una metodología de diseño que considere la interacción de los análisis geotécnico, estructural y geotérmico, además de la falta de práctica en la elección de la bomba de calor adecuada para suministrar las cargas térmicas requeridas por los edificios para su aclimatación.

En este sentido, el objetivo principal de este trabajo es proporcionar una serie de recomendaciones sobre el diseño y construcción de las pilas de energía, con lo que se pretende mejorar su implementación en México. Para ello, se exponen los diferentes arreglos de tuberías intercambiadoras de calor y se proponen diversos criterios para su elección.

En la parte principal de esta tesis, se presentan los aspectos más relevantes para la implementación de una estructura termoactiva y las distintas metodologías de diseño térmico. En particular, se describen los modelos analíticos utilizados en la práctica para calcular la variación de temperatura en el fluido intercambiador de calor y en la periferia de una pila de energía. Posteriormente, se realiza el cálculo de la variación de temperatura en el fluido y en la periferia de una pila de energía construida en una zona costera del estado de Jalisco. El estudio se lleva a cabo con tres métodos analíticos: fuente lineal infinita, fuente lineal finita y fuente cilíndrica infinita. Adicionalmente, se comparan los valores obtenidos con cada método y se discute su factibilidad de aplicación.

Por último, se proporcionan las conclusiones y recomendaciones que deben considerarse para la implementación de pilas de energía en México.

ABSTRACT

Thermoactive structures, particularly energy piles, are a clean alternative to meet the growing demand for space conditioning. In Mexico, this technology has not been used because there are some challenges for its implementation. The main limitations are related to the scarce of information available on these systems, the lack of a design methodology that considers the interaction of geotechnical and structural analysis, and the lack of knowledge on the choice of the appropriate heat pump to supply thermal loads to buildings.

In this context, the main objective of this work is to provide several recommendations on the design and construction of energy piles, with the aim of improving the overview for their implementation in Mexico. Thus, the different arrangements of heat exchanger pipes are presented and some criteria for their selection are proposed.

In the main part of the thesis, the most relevant aspects for the implementation of a thermoactive structure and the different thermal design methodologies are presented. In particular, the analytical models used in practice to calculate the temperature variation in the heat carrier fluid and in the periphery of an energy pile are described. Subsequently, the calculation of the temperature variation in the fluid and in the periphery of an energy pile built in the coastal zone of the state of Jalisco is performed. The study is carried out with three analytical methods: infinite line source, finite line source, and infinite cylindrical source. In addition, the values obtained with each method are compared and their feasibility of application is discussed.

Finally, conclusions and recommendations to be considered for the implementation of energy piles in Mexico are provided.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de ventiladores al día y su tipo (INEGI, 2018)	6
Figura 2.2. Número de equipos de aire acondicionado y porcentaje de viviendas con al menos un equipo, por región climática (INEGI, 2018)	6
Figura 2.3. Número de equipos de aire acondicionado y porcentaje de viviendas con al menos un equipo, por región climática (INEGI, 2018).....	7
Figura 2.4. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de equipos de aire acondicionado al día y su tipo (INEGI, 2018).....	7
Figura 2.5. Porcentaje de viviendas particulares habitadas en las que usan calefactor por región climática (INEGI, 2018).....	8
Figura 2.6. Número de equipos de calefacción en uso en viviendas particulares habitadas por tipo de calefactor (INEGI, 2018).....	8
Figura 2.7. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de equipos de calefacción al día y su tipo (INEGI, 2018).	9
Figura 2.8. Funcionamiento de las pilas de energía: (a) durante el invierno; (b) durante el verano.....	10
Figura 2.9. Esquema de prueba TRT (adaptado de Sanner <i>et al.</i> , 2005).....	14
Figura 2.10. (a) Fotografía de la prueba de respuesta térmica (TRT) en el sitio de estudio, (b) pozo de prueba, (c) pantalla de monitoreo de temperaturas, presiones y flujo y (d) pozo de observación (Rivera-Martínez. 2021).....	15
Figura 2.11. Esquema de distintos arreglos de tuberías intercambiadoras de calor (adaptado de Gao <i>et al.</i> , 2008).....	21
Figura 2.12. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería en U: (a) 60 cm de diámetro y (b) 40 cm de diámetro.....	25
Figura 2.13. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería en U: (a) 60 cm de diámetro y (b) 40 cm de diámetro.....	26
Figura 2.14. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería en doble U. (a) 60 cm de diámetro; (b) 80 cm de diámetro.....	28
Figura 2.15. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería en doble U: (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro.....	29
Figura 2.16. Esquema de la pila de energía con tubería en triple U: (a) Sección transversal; (b) Sección longitudinal.....	30
Figura 2.17. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería en doble W: (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro.....	31

Figura 2.18. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería en W: (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro.....	32
Figura 2.19. Esquema de la pila de energía con tubería helicoidal: (a) Sección transversal; (b) Sección longitudinal.....	33
Figura 3.1. Diagrama de flujo de soluciones analíticas para pilas de energía (adaptado de Loveridge <i>et al.</i> , 2013)	54
Figura 3.2. Separación mínima entre tuberías y refuerzo longitudinal.....	56
Figura 3.3. Separación mínima del final del bucle.....	57
Figura 3.4. Procedimiento constructivo: (a) perforación del barreno, (b) colocación del armado y (c) colado de la pila.....	59
Figura 3.5. Fotografías del procedimiento constructivo de una pila de energía en el estado de Jalisco (López-Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	60
Figura 3.6. Detalle de la sección transversal de la pila de energía.....	61
Figura 3.7. Detalle de la sección longitudinal de la pila de energía.....	61
Figura 3.8. Esquema de reacción (adaptado de Sámano <i>et al.</i> , 2006).....	64
Figura 3.9. Sección transversal de la pila con instrumentación.....	65
Figura 3.10. Sección longitudinal de la pila de energía con su respectiva instrumentación.....	66
Figura 4.1. Proceso de diseño de las pilas de energía.....	68
Figura 4.2. Localización geográfica del sitio de estudio.....	69
Figura 4.3. Variación de la temperatura ambiente en el sitio de estudio (López Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	69
Figura 4.4. Estratigrafía y propiedades geotérmicas del sitio de estudio (López Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	70
Figura 4.5. Esquema de la estratigrafía del sitio.....	71
Figura 4.6. Gráfica de cargas térmicas durante un año (López Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	72
Figura 4.7. Arreglo de tuberías en la pila de energía (adaptado de López Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	74
Figura 4.8. Detalle de conformación de los bucles (adaptado de López Acosta <i>et al.</i> , 2022).....	74
Figura 4.9. Sección longitudinal de la pila.....	75
Figura 4.10. Variación de temperatura en el fluido de entrada durante un año.....	76
Figura 4.11. Variación de temperatura en el fluido de salida durante un año.....	76
Figura 4.12. Variación de temperatura en el fluido promedio durante un año.....	77

Figura 4.13. Valores máximos de la variación de temperatura promedio en el fluido.....	77
Figura 4.14. Variación de temperatura en la periferia de la pila durante un año.....	78
Figura 4.15. Valores máximos de la variación de temperatura en la periferia de la pila.....	79
Figura 4.16. Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método (FLSM).....	79
Figura 4.17. Valores máximos de la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con los métodos (ILSM), (FLSM) y (ICSM).....	80
Figura 4.18. Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método (FLSM).....	81
Figura A.1. Cargas térmicas aplicadas (adaptado de Laloui <i>et al.</i> , 2003).....	93
Figura A.2. Esfuerzos térmicos verticales en EPFL para: (a) carga térmica de 13.4°C y (b) Durante el ciclo calentamiento-enfriamiento (Laloui <i>et al.</i> , 2006).....	93
Figura A.3. Esfuerzos termo-mecánicos verticales en la pila: (a) resultados experimentales; (b) Simulaciones numéricas (Laloui <i>et al.</i> , 2006).....	94
Figura A.4. Desplazamientos detectados en la cabeza del pilote durante la prueba de caracterización térmica del sistema: (a) Desplazamientos verticales; (b) Desplazamientos horizontales (Groot Viana, 2017).....	95
Figura A.5. Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ensayo C (extensómetros) (Groot Viana, 2017).....	96
Figura A.6. Deformaciones axiales térmicas en el tiempo durante la prueba de respuesta térmica en la fase de calentamiento y posterior recuperación: (a) cimentación 1, (b) cimentación 2 y (c) cimentación 3 (Murphy <i>et al.</i> , 2015)	97
Figura A.7. Perfiles de deformaciones axiales térmicas para diferentes cambios de temperatura en las cimentaciones durante el calentamiento: (a) Perforación 1, (b) Perforación 2 y (c) Perforación 3 (Murphy <i>et al.</i> , 2015).....	98
Figura A.8. Resultados numéricos del desempeño de transferencia de calor y su comparación con los resultados experimentales (Gao <i>et al.</i> , 2008).....	100
Figura A.9. Configuraciones del circuito primario: (a) pila con tubería en W y (b) pila con tubería helicoidal (adaptado de Seok Yoon <i>et al.</i> , 2015).....	101
Figura A.10. Resultados de la prueba de desempeño térmico TPT (Thermal Performance Test): (a) Pila con tubería en W; (b) Pila con tubería helicoidal (adaptado de Seok Yoon <i>et al.</i> , 2015).....	102
Figura A.11. Tasa de intercambio térmico específica para los cuatro tipos diferentes de intercambiadores de calor, todos con un diámetro de tubería de 25 mm: (a) Simulación de refrigeración de un edificio y (b) Simulación de calefacción de un edificio (Luo <i>et al.</i> , 2014).....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Cuadro comparativo de las pilas de energía según su arreglo de tubería intercambiadora de calor.....	23
Tabla 2.2. Modelos para el cálculo de R_b para tuberías intercambiadoras de calor con configuración de U simple.....	36
Tabla 3.1. Tabla 3.1. Número máximo de bucles en función del diámetro de la pila (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta <i>et al.</i> , 2020).....	56
Tabla 4.1. Parámetros empleados en el análisis (López Acosta <i>et al.</i> ,2022).....	71
Tabla A.1. Rendimiento de pilas de energía a partir de datos experimentales (Gao <i>et al.</i> , 2008).....	99

NOTACIÓN

q	Flujo de calor por unidad de tiempo
λ	Conductividad térmica
λ_{eff}	Conductividad térmica efectiva
dT/dX	Gradiente de temperatura a través del medio conductor
C_c	Capacidad calorífica
D	Difusividad térmica
k	Inclinación de la curva de temperatura contra el tiempo
H	Longitud del pozo intercambiador de calor
Q	Calor de inyección/extracción
ΔT	Cambio de temperatura
α	Coefficiente de expansión térmico del material
ε_T	Deformación inducida térmicamente
E	Módulo de Young
ε_{T-Rstr}	Deformación restringida
ε_{T-real}	Deformación debida a los cambios de temperatura
K_h	La rigidez del elemento estructural conectado a la pila
$w(z=0)$	Desplazamiento vertical en la cabeza de la pila
W	Peso de la pila
$Q_{s,mob}$	Capacidad de carga por fuste
$Q_{b,mob}$	Capacidad de carga por punta.
$Q_{s,m,mob}$	Resistencia a la fricción por contribución mecánica
$Q_{s,th,mob}$	Resistencia a la fricción por contribución térmica
$Q_{b,m,mob}$	Aportación a la punta por carga mecánica
$Q_{b,th,mob}$	Aportación a la punta por carga térmica
$Q_{s,mob,up}$	Resistencia a la fricción movilizada sobre el eje nulo
$Q_{s,mob,down}$	Resistencia a la fricción movilizada debajo del eje nulo
τ	Esfuerzo cortante
ε_{rstr}	Deformación térmica restringida
ε_0^{th}	Deformaciones térmicas observadas
E_{EP}	Módulo de elasticidad de la pila
ε^{th}_f	Deformación bajo condiciones de expansión térmica libre igual a $-\alpha_{EP}\Delta T$
α_{EP}	Coefficiente lineal de expansión térmica de la pila
ΔT	Variación de temperatura aplicada
DOF	Grado de libertad de la pila igual a $\varepsilon^{th}_0 / \varepsilon^{th}_f$
f_{ct}	Resistencia a la compresión
E_c	Módulo de elasticidad del concreto
A_{EP}	Área de la sección transversal de la pila de energía
ρ_r	Relación entre el área de acero longitudinal y la sección transversal igual a A_r/A_{EP}
n_{rc}	Relación de rigidez entre el acero y el concreto que depende de la relación E_r/E_c
E_r	Módulo de elasticidad del acero de refuerzo
A_c	Área del concreto igual a $A_{EP} - A_r$

N_r	Proporción de la fuerza axial N recibida por el refuerzo
N_R	Resistencia a la fuerza axial
f_y	Resistencia del acero en campo
R_p	Resistencia térmica de la tubería
k_p	Conductividad térmica de la tubería en configuración de U simple
r_o	Radio exterior de la tubería
r_i	Radio interior de la tubería
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección
$k_{s,e}$	Conductividad térmica equivalente
$k_{s,i}$	Conductividad térmica de la tubería
b_i	Espesor de la "iésima" capa del terreno
N	Número total de estratos
D	Mitad del espacio entre las patas de la tubería en U
s	Variable adimensional se define como $(k_b - k_s)/(k_b + k_s)$
k_s	Conductividades térmicas del suelo
k_b	Conductividades térmicas de los materiales de relleno
E_1	Integral exponencial
T_g	Temperatura inicial del medio
q	Carga calorífica específica
k	Conductividad térmica del medio homogéneo
α	Difusividad térmica del medio homogéneo
r	Distancia radial desde la fuente de línea
t	Tiempo en el que se aplica la fuente lineal continua
T_f	Temperatura media del fluido dentro del pozo
T_g	Temperatura del suelo inalterada
k	Conductividad térmica efectiva del suelo
R_b	Resistencia térmica efectiva del pozo
F_0	Número de Fourier (α_i/r_b^2)
$erfc$	Función de error complementaria
Γ	Factor de respuesta térmica
R_b^*	Resistencia efectiva del pozo
R_p	Resistencia de la tubería
R_{gt}	Resistencia de la lechada en el pozo
q	Tasa de transferencia de calor entre la pila y el suelo
L_{bore}	Longitud de la pila
t_q	Temperatura del suelo
t_w	Temperatura media del agua del circuito
R_{ov}	Resistencia térmica total del suelo y pila
q_{evap}	Tasa de calor del evaporador de la bomba de calor
q_{lh}	Carga de diseño para calentamiento
COP_h	Coefficiente de desempeño en modo calefacción
q_a	Transferencia de calor neta anual
$EFLH_C$	las horas equivalentes en plena carga de refrigeración
$EFLH_h$	las horas equivalentes en plena carga de calefacción
q	La tasa de calor
t_g	Temperatura del suelo
R	Resistencia térmica del suelo por unidad de longitud

L_c	Longitud de las pilas requerida para enfriamiento
L_h	Longitud de las pilas requerida para calentamiento
q_a	Promedio anual neto de transferencia de calor al subsuelo
R_{ga}	Resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor a largo plazo
q_{cond}	Tasa de calor inyectada al suelo
R_b	Resistencia térmica de la pila
R_{gm}	Resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor mensual
R_{gst}	Resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor corto
PLF_m	Factor de carga parcial para el mes de diseño
F_{sc}	Factor de pérdida de calor entre las tuberías de ingreso y salida de la pila
ELT	Temperatura de entrada del líquido a la bomba de calor
LLT	Temperatura de salida del líquido a la bomba de calor
L_t	Longitud de pilas de energía referida durante la fase de calentamiento.
q_e	Carga térmica pico horaria transmitida al suelo
q_y	Carga térmica promedio anual transmitida al suelo
q_m	Carga térmica promedio mensual transmitida al suelo para el mes de diseño
FS_c	Factor de pérdida de calor
T_0	Temperatura inicial del suelo
VA	Valor anual
VP	Valor presente
PRS	Periodo de recuperación simple
i	Tasa de interés efectiva
k	Índice para cada período de estudio
F_k	Flujo de caja futuro al final del periodo
N	Número de periodos de estudio
R	Ahorro anual equivalente de un proyecto
E	Gasto anual equivalente
I	Inversión inicial
CR	Cantidad anual equivalente de recuperación de capital
C	Costo del intercambiador de calor por metro de longitud de tubería
L	Total de la longitud de las tuberías
P_p	Precio por un metro de tubería
H	Longitud total de las pilas de energía
E	Beneficios operativos
q_h	Tasa de intercambio térmico en la fase de
t_h	Duración promedio de operación del sistema en fase de calentamiento
q_c	Tasa de intercambio térmico en la fase de enfriamiento
t_c	Duración promedio de operación del sistema en la fase de enfriamiento
P_e	Precio de la electricidad
IAI	índice ahorro-inversión
B	Beneficios
C	Costo de la tubería
VPN	Valor presente neto
TIR	Tasa interna de retorno
PDR	Período de recuperación

T_{in}	Temperatura de entrada del fluido
T_{out}	Temperatura de salida del fluido
ρ_f	Densidad
$c_{p,f}$	Calor específico del fluido portador de calor
V	Caudal volumétrico
n	Punto del tiempo normalizado en el que se evalúa la superposición
G	Función G calculada para el calor de $F0$

1. INTRODUCCIÓN

La investigación y el uso de energías renovables es un tema que ha ganado relevancia en los últimos años. Su implementación se vislumbra como una alternativa para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, producto del uso cotidiano de combustibles fósiles. El impacto ambiental en la industria de la construcción ha disminuido gracias a la utilización de fuentes bajas en carbono en diversas edificaciones (Lee *et al.*, 2021). Así, las nuevas generaciones tenemos la responsabilidad de desarrollar estas tecnologías que se basan en el aprovechamiento de energías limpias y sustituyen a los sistemas convencionales.

En el campo de la ingeniería civil, específicamente en el área de la geotecnia, se verifica que las cimentaciones cumplan con una serie de requisitos de diseño que aseguren su correcto funcionamiento. Diferentes normativas se basan en los principios de los estados límite de falla y de servicio. Los estados

límite de falla evalúan que se cumplan las condiciones de capacidad de carga y los de servicio estudian las deformaciones máximas admisibles.

El diseño geotécnico y estructural de una cimentación considera condiciones regionales como: geología regional, propiedades índice y mecánicas del suelo, topografía del sitio, sismicidad, efectos de amplificación debidos al tipo de depósitos existentes en el terreno, viento, huracanes, clima, inundaciones, cavernas, grietas, fallas geológicas, estabilidad de los taludes, excavación (somera o profunda) y riesgo de licuación de arenas. Las propiedades geotérmicas del suelo, el efecto de la variación de temperatura en el estado de esfuerzos del terreno y las deformaciones de la estructura son despreciadas debido a su poca relevancia en la respuesta de una estructura convencional. Sin embargo, dichos

parámetros son de suma importancia para el diseño y construcción de las pilas de energía. En consecuencia, las investigaciones realizadas en este rubro tienen como propósito que la normativa mexicana considere el comportamiento termo-mecánico del suelo y los elementos de cimentación. Lo anterior destaca la necesidad de incluir los parámetros térmicos y sus efectos en la caracterización del sitio de estudio.

La conductividad térmica se define como la cantidad de calor que fluye por una sección transversal en un determinado tiempo, bajo un gradiente de temperatura aplicado en la dirección del flujo de calor. Este valor está en función de la composición mineralógica, porosidad, grado de saturación, contenido de agua y temperatura (Moel *et al.*, 2010). La difusividad térmica representa la facilidad con la que un material acepta un cambio de temperatura, cuantitativamente representa la profundidad y velocidad de penetración de una onda de calor en el terreno. Mientras que, la capacidad calorífica describe la habilidad de un material para almacenar calor.

El correcto funcionamiento de un sistema a base de pilas de energía depende de la eficiencia con la que opera la bomba de calor, ya que requiere una temperatura específica para trabajar de forma óptima. Para ello, es necesario obtener la variación de temperatura del fluido en la entrada y salida, así como en la periferia de la pila. Al respecto, se pueden aplicar diversos métodos analíticos como: el modelo de fuente lineal infinita (ILSM), el modelo de fuente lineal finita (FLSM) y el modelo de fuente cilíndrica infinita (ICSM) (Loveridge *et al.*, 2013).

Por otra parte, existen algunos aspectos que deben considerarse durante la construcción de las pilas de energía para garantizar que el sistema trabaje de manera correcta. En el caso de las tuberías, se deben cumplir las siguientes especificaciones: material y manejo adecuado durante su colocación y fijación al acero de refuerzo, las uniones de la tubería deben realizarse por termofusión, ejecución de pruebas de purgado y un adecuado control de calidad.

El objetivo general de esta tesis es proporcionar una serie de recomendaciones sobre el diseño y construcción de las pilas de energía, señalando los aspectos más relevantes relacionados con la operación de una estructura termoactiva. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo principal establecer una metodología práctica para la implementación 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 presenta el marco teórico sobre el consumo energético para el acondicionamiento de edificaciones en México y el panorama actual de las estructuras termoactivas en el mundo. Posteriormente, se describen los principales parámetros térmicos del suelo y sus métodos de determinación. En seguida, se analiza el comportamiento termo-mecánico de pilas de energía resaltando los efectos de los cambios de temperatura en la interacción pila-suelo. Luego, se describen las ventajas y desventajas de los diferentes arreglos de tuberías intercambiadoras de calor. Al respecto,

se sugiere una clasificación de las pilas de energía con base en la configuración de la tubería, proponiendo un criterio de elección para su implementación en sistemas de cimentación. En la parte final de este capítulo, se detallan las soluciones analíticas para el cálculo de la variación de temperatura en el fluido y la periferia de la pila. Al final, se presentan algunas consideraciones para la construcción, instrumentación y pruebas de carga en pilas de energía.

En el Capítulo 3 se exponen los diferentes criterios de diseño y construcción de pilas de energía. Se explican las implicaciones que tiene el transporte de calor en el suelo y dentro de una pila de energía. Asimismo, se describen los efectos del transporte de calor en la superficie del suelo y las interacciones térmicas que pueden presentarse en grupos de pilas o en las tuberías del circuito primario. En este capítulo, se presentan los métodos analíticos para realizar el análisis térmico de estos elementos, así como algunas recomendaciones para la construcción de las pilas de energía. Por último, se describe el procedimiento para realizar una prueba de carga estática, la instrumentación y el sistema de adquisición de datos que se puede emplear.

En el Capítulo 4 se implementan los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) para calcular la variación de temperatura en una pila de energía ubicada en la zona costera del estado de Jalisco. Al inicio del capítulo se define la estratigrafía y las propiedades geotérmicas del sitio. Enseguida, se describen de forma detallada las consideraciones generales para el análisis. Al final del Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y su interpretación.

Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones y recomendaciones para la futura implementación de pilas de energía en México.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En la actualidad, las fuentes de energías limpias y de bajo costo se han vuelto una prioridad en el área de la investigación ya que existe una creciente demanda energética a nivel mundial. Por lo tanto, es esencial desarrollar tecnologías que reduzcan el impacto ambiental. En este contexto, el principal desafío está relacionado con la limitada comprensión y la falta de especificaciones para su implementación.

Uno de los sectores con mayor consumo de energía en México es el de las edificaciones para uso residencial y comercial, especialmente el abastecimiento de agua caliente doméstica y la climatización de espacios (SENER y AIE, 2011). Esto se debe a que la demanda de energía es proporcional al crecimiento demográfico. Su uso se ha extendido en regiones con climas más extremos donde el requerimiento de climatización se solventa con energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles.

De acuerdo con los datos de la encuesta nacional de consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI), durante 2018 el 45% de las viviendas urbanas en México utilizaban ventiladores, mientras que en las localidades rurales el 41%. El número de ventiladores por vivienda varían desde uno hasta los cuatro. En la Figura 2.1 se observa la distribución porcentual del número de ventiladores en uso de viviendas particulares habitadas y número de equipos por número en uso.

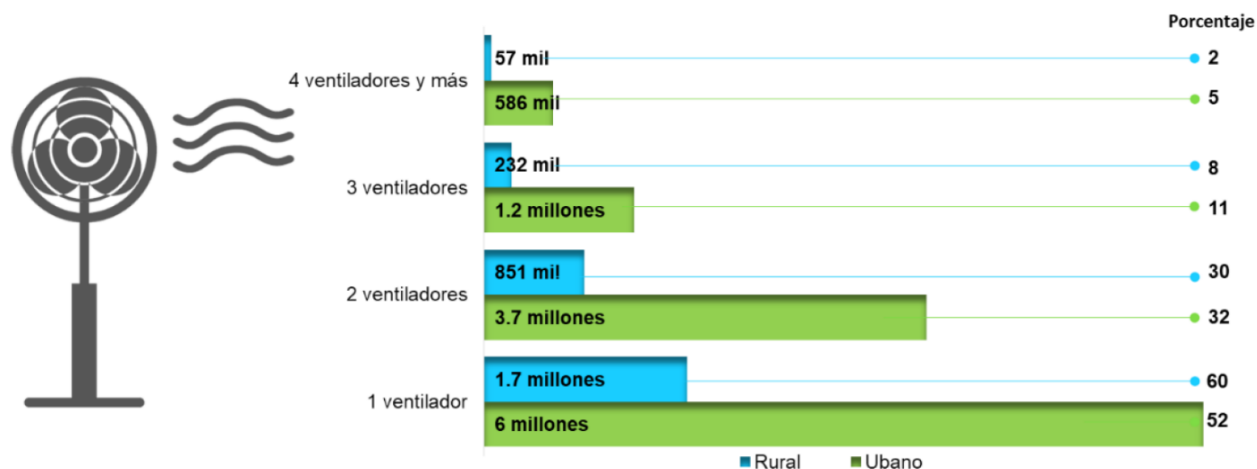


Figura 2.1. Distribución porcentual de ventiladores en uso en viviendas particulares (INEGI, 2018)

En la Figura 2.2 se aprecia que el número de ventiladores por vivienda varía también por tipo de localidad. Los resultados de la encuesta también indican que el 34.4% de las viviendas utiliza uno o más ventiladores entre cinco y nueve horas al día para atenuar la sensación de calor (INEGI, 2018).

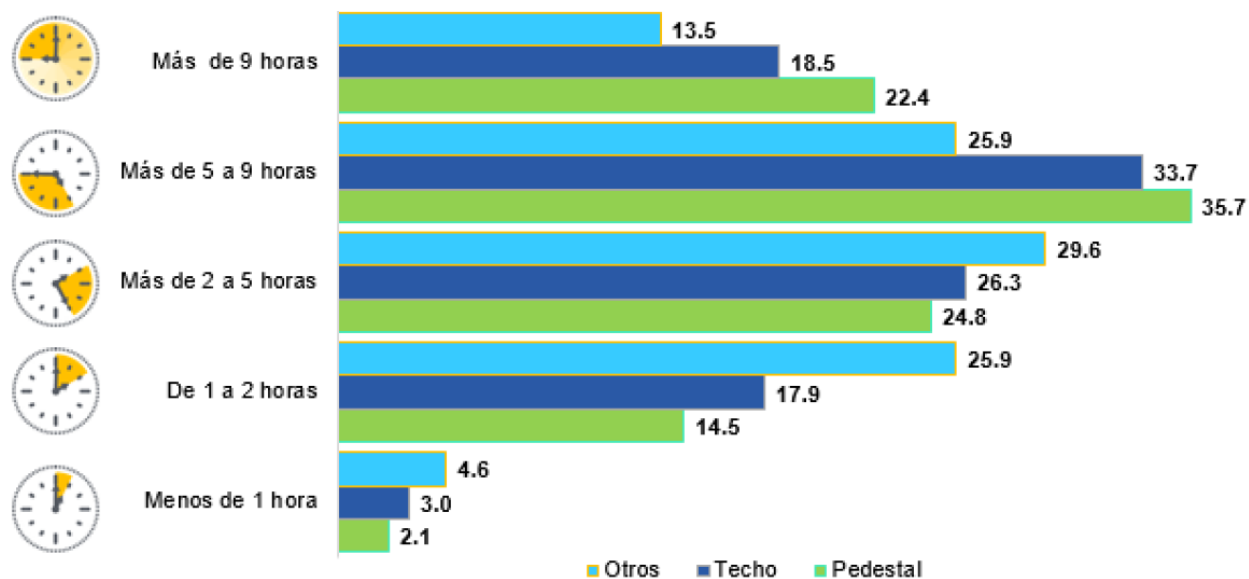


Figura 2.2. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de ventiladores al día y su tipo (INEGI, 2018)

En México, el empleo de equipos de aire acondicionado aumentó en los últimos años (INEGI, 2018). El número de dichos sistemas varía por región climática, como se muestra en la Figura 2.3. En las regiones cálidas más extremas del país, el 48% de las viviendas tiene al menos un equipo de aire acondicionado, por lo que en total se contabilizan aproximadamente más de siete millones de equipos en uso en viviendas particulares en el país.

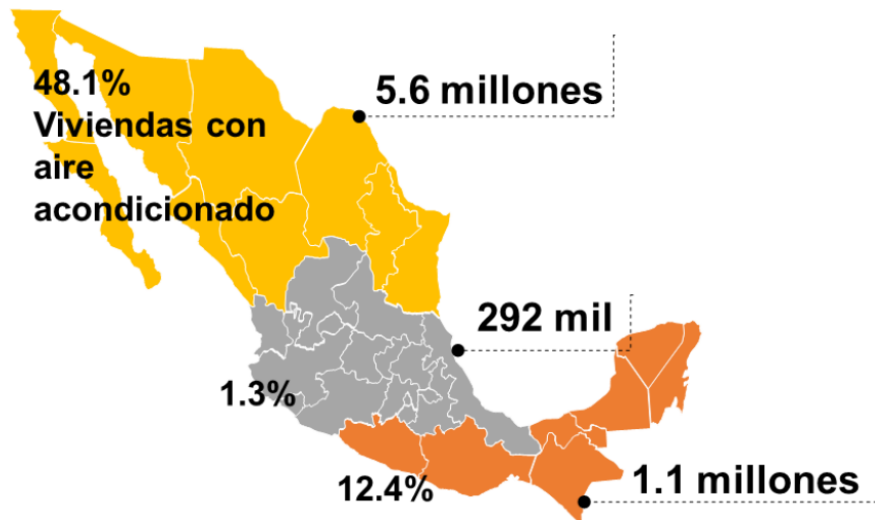


Figura 2.3. Número de equipos de aire acondicionado y porcentaje de viviendas con al menos un equipo, por región climática (INEGI, 2018)

Como se muestra en la Figura 2.4, de manera análoga con los ventiladores, se tiene como dato que del 28 al 42% de los equipos de aire acondicionado se mantienen funcionando de entre cinco a nueve horas diarias (INEGI, 2018).

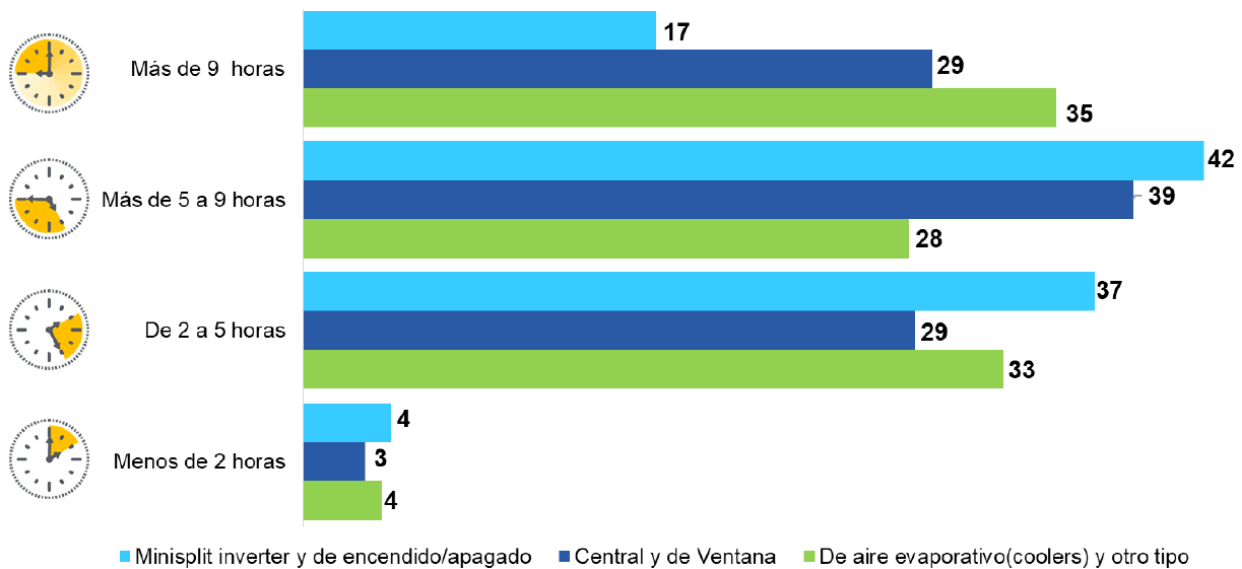


Figura 2.4. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de equipos de aire acondicionado al día y su tipo (INEGI, 2018)

En la Figura 2.5 se presenta en porcentaje el tiempo en el que se mantienen en operación los tres tipos distintos de equipos de aire acondicionado en viviendas particulares. El uso de algún tipo de equipo de calefacción en México es del 6.3% de las viviendas del país, lo que representan cerca de 2.6 millones de equipos en uso, de los cuales, más de 2 millones se encuentran concentrados en la región cálida extrema; en la región templada se tienen 489 mil y en la región tropical 34 mil equipos (INEGI, 2018).

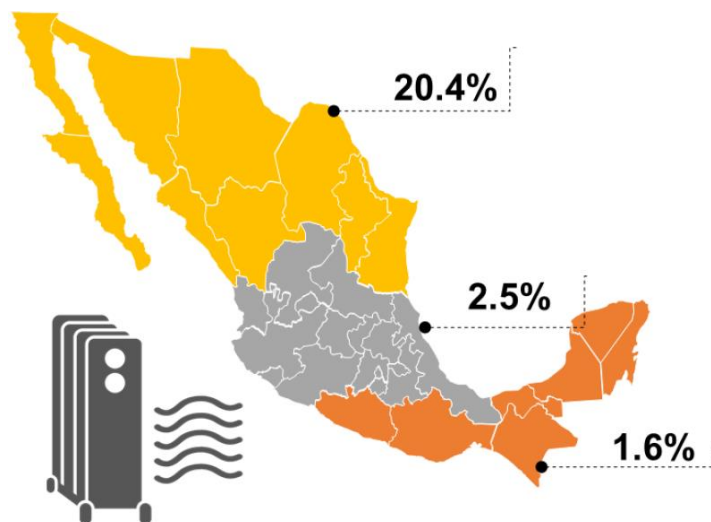


Figura 2.5. Porcentaje de viviendas particulares habitadas en las que usan calefactor por región climática (INEGI, 2018)

En el caso de los equipos de calefacción, se emplea una fuente de energía eléctrica y de gas principalmente. En la Figura 2.6, se muestran los datos obtenidos de la (ENCEVI).

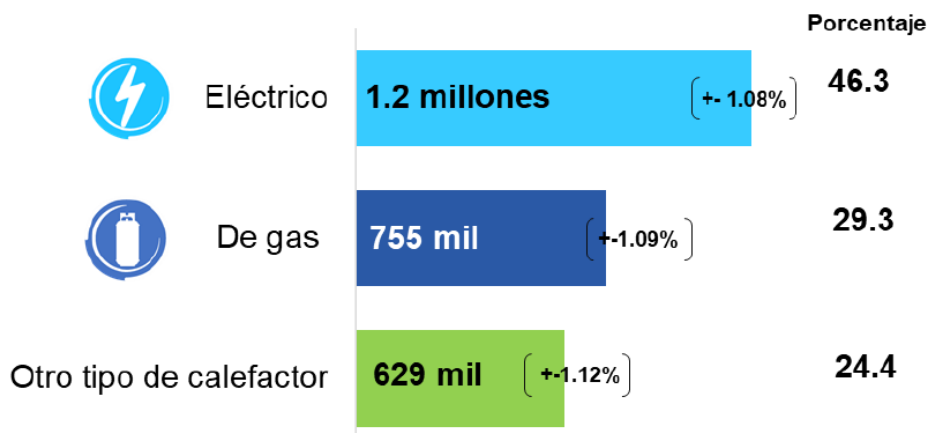


Figura 2.6. Número de equipos de calefacción en uso en viviendas particulares habitadas por tipo de calefactor (INEGI, 2018)

En la Figura 2.7 se muestra la distribución porcentual de viviendas particulares habitadas en las que se utilizan calefactores, según el tipo y tiempo de uso. Se observa que del 35 al 41% de los equipos de calefacción permanecen encendidos de dos a cinco horas, lo que representa un consumo energético significativo.

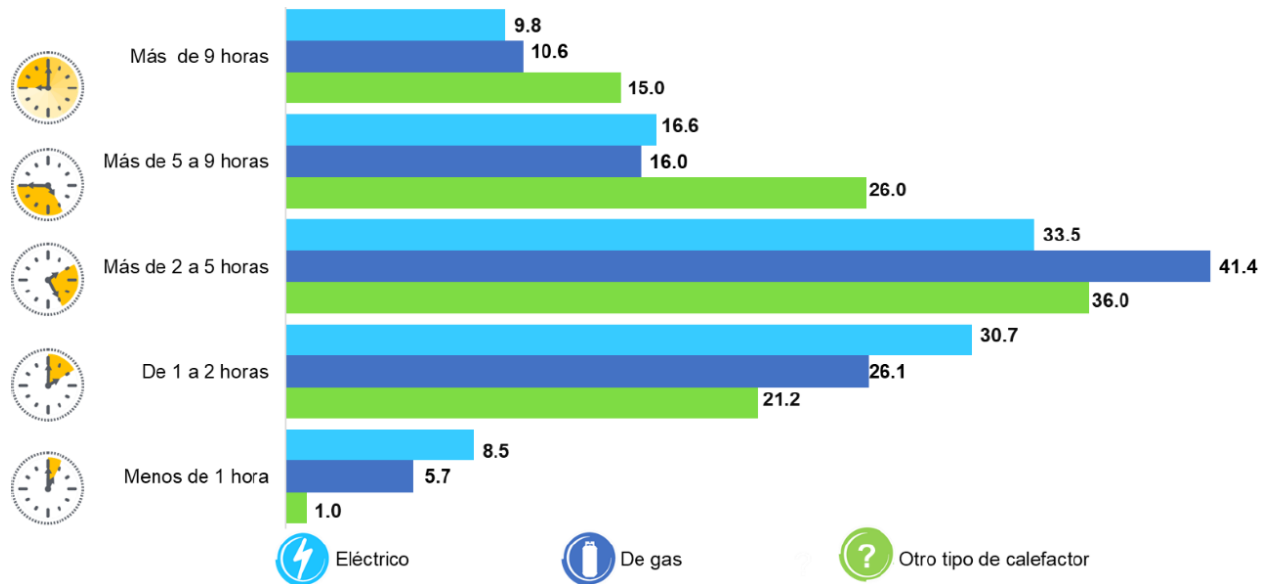


Figura 2.7. Distribución porcentual de viviendas particulares según el tiempo de uso de equipos de calefacción al día y su tipo (INEGI, 2018)

Por otra parte, una alternativa para sustituir el uso de la energía termoeléctrica (producto del empleo de gas natural, gas LP y combustibles contaminantes) consiste en aprovechar la energía geotérmica mediante la implementación de cimentaciones termoactivas. Su aplicación permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y tiene beneficios económicos respecto a los sistemas convencionales, con periodos de recuperación de la inversión de cinco a diez años dependiendo las propiedades térmicas del suelo (Moel *et al.*, 2010). Brandl (2006) estudió la factibilidad de incorporar intercambiadores de calor en las cimentaciones de los edificios, haciendo uso de la capacidad calorífica y la alta conductividad térmica del concreto. Estas estructuras tienen doble propósito ya que utilizan los elementos requeridos tanto por razones estructurales como una unidad intercambiadora de calor, denominadas como *pilas de energía*. El sistema consta de un circuito cerrado de tuberías embebidas en las pilas, una bomba de calor que ajusta la temperatura a niveles aprovechables y una red de tuberías colocadas en los pisos y muros de la edificación.

La Figura 2.8 muestra un esquema del funcionamiento de un sistema de climatización a base de pilas de energía. En invierno, el sistema primario se encarga de extraer la energía térmica del subsuelo y posteriormente suministrarlo a la edificación por medio del circuito secundario para proveer calor. En cambio, durante el verano, el circuito secundario extrae el calor de la edificación y lo inyecta al suelo mediante el circuito primario.

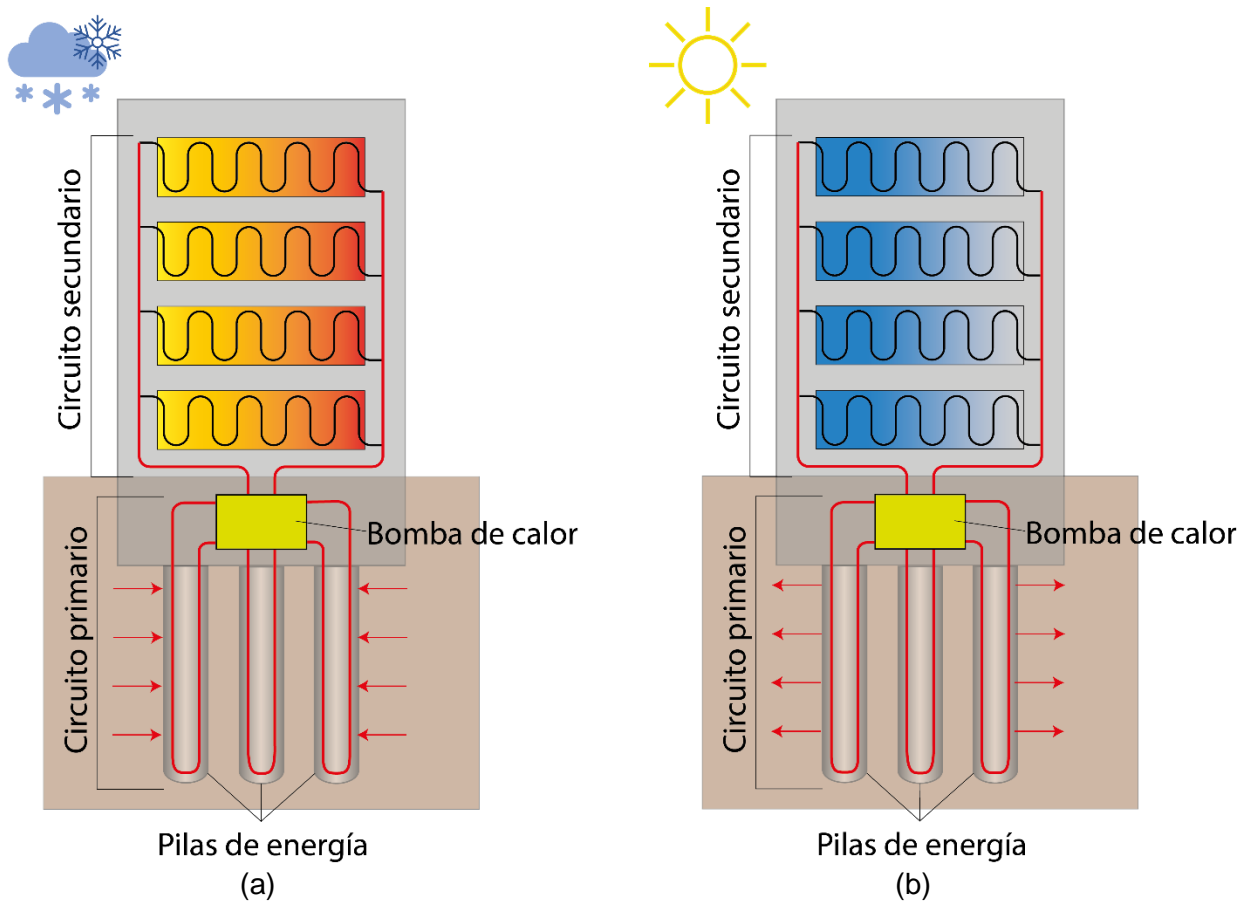


Figura 2.8. Funcionamiento de las pilas de energía: (a) durante el invierno y (b) durante el verano

El empleo de una nueva tecnología requiere del conocimiento detallado de las variaciones que pueda tener respecto al comportamiento de los elementos convencionales. En el caso de las pilas de energía, los ciclos de calentamiento/enfriamiento pueden afectar su comportamiento geotécnico y estructural. La expansión y contracción térmica sucesivas producen esfuerzos y deformaciones adicionales a lo largo de la cimentación. En los últimos años, diversos países como Suiza (Laloui *et al.*, 2015), España (De Groot, 2017), Estados Unidos (Murphy *et al.*, 2015) y Corea del Sur (Park *et al.*, 2015) han estudiado los efectos de los cambios de temperatura en las estructuras con la finalidad de mejorar su diseño y evitar costos adicionales.

En el análisis y diseño de pilas de energía se deben considerar los efectos de la temperatura en el comportamiento mecánico de la interacción pila-suelo. Estos elementos están sujetos a cambios de temperatura que varían en un rango de 0-50°C. En consecuencia, la respuesta del sistema adquiere mayor complejidad debido a las deformaciones y cargas termo-mecánicas. La variación de temperatura produce cambios en la interfaz pila-suelo, afectando su capacidad de carga. Asimismo, puede reducir la

eficiencia con la que opera la bomba de calor, ya que requiere una temperatura específica para trabajar de forma eficiente.

En México las cimentaciones termoactivas no se utilizan actualmente. La principal limitación se relaciona con el desconocimiento de la tecnología, el diseño térmico, el comportamiento geotécnico y estructural, así como de las propiedades térmicas de los suelos mexicanos. Cabe señalar que, su factibilidad de aplicación en el país aún no ha sido evaluada afectando la posible inversión del sector público o privado.

En este apartado se presenta una revisión bibliográfica de casos en los que se han implementado pilas de energía como sistema de cimentación y de suministro de energía térmica en distintos países del mundo. Austria, Suiza y Alemania son considerados países pioneros que han investigado esta tecnología durante décadas. Austria ha destacado el uso extensivo de sistemas intercambiadores de calor en el suelo. Dos ejemplos notables son (Moel *et al.*, 2010):

- LT24 del túnel de Lainzer
- Uniqa Tower en el centro de Viena.

Los dos casos han recibido la atención de varios autores (Bouazza, 2015). La sección del túnel Lainzer (Moel *et al.*, 2010) emplea pilas de energía en sus muros laterales. De las numerosas pilas que fueron construidas, cada tercera pila fue convertida en una de energía (al extraer energía geotérmica) para calentar y enfriar estaciones de ferrocarril, edificios administrativos y prevenir daños por heladas en plataformas y puentes. La Torre Uniqa está cimentada sobre una base de madera con dos muros diafragma hasta los 35 m de profundidad. La energía se extrae para la calefacción de espacios dentro del edificio y como ayuda a los sistemas convencionales para satisfacer las necesidades por enfriamiento.

El segundo caso es el centro de rehabilitación Bad Schallerbach. Durante las obras de construcción, se instaló una pila instrumentada, que forma parte de un sistema intercambiador de calor, con 143 pilas (Brandl, 2006). Las pilas son parte de una balsa apilada que sostiene un edificio de siete pisos que está colocado en un sitio inclinado. La pila de prueba estaba equipada con celdas de presión en la punta y la cabeza, fisurómetros en tres niveles y termoelementos en cinco niveles. Los datos se recopilaban de forma intermitente en diferentes épocas del año durante varios años de funcionamiento del sistema. Brandl (2006) informa que el trabajo de cimentación se completó en 1994-1995 y que la estructura del edificio con el 90% de la carga muerta en su lugar se completó en el otoño de 1996. El sistema entró en pleno funcionamiento un año más tarde.

Suiza ha tenido varias décadas de experiencia con las bombas de calor geotérmico (Moel *et al.*, 2010). La tecnología se utiliza en muchas casas residenciales en forma de

extracción de calor por medio de pozos para la distribución de calor. El sistema de extracción de calor de pozo más grande se encuentra en un spa cerca de St. Moritz y consta de 40 perforaciones. Dos ejemplos notables de proyectos que han empleado el uso de pilas de energía se encuentran en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Laloui *et al.*, 2015) y el aeropuerto de Dock Midfield (Moel *et al.*, 2010).

El proyecto Lausana (Laloui *et al.*, 2006) también ha sido parte de un extenso programa de monitoreo de desempeño, en particular, la investigación del comportamiento termo-hidro-mecánico del suelo que lo rodea. Esta prueba de campo se llevó a cabo en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), Suiza, durante la construcción de un nuevo edificio en el campus. La pila está ubicada en el borde de un edificio de cuatro pisos, que estaba en construcción durante el período de prueba. El elemento funcionó como elemento e intercambiador de energía. Las conclusiones generales de las investigaciones (Laloui *et al.*, 2006) mostraron que las deformaciones termo-elásticas eran mayores que las deformaciones inducidas mecánicamente. Sin embargo, los efectos globales de la carga térmica sobre las presiones intersticiales y las tensiones efectivas se consideraron mínimas. En Suiza hay más de 40 proyectos construidos a base de cimentaciones de pilas energía, incluyendo edificios industriales, casas, escuelas y aeropuertos (Laloui y Di Donna, 2011). El más famoso de estos es la terminal de Dock Midfield en el aeropuerto de Zurich, el cual ha estado en operación desde septiembre del 2003. Su cimentación consiste en 350 pilas de concreto de 27 metros de longitud, con 0.9-1.5 m de diámetro, de las cuales, 306 son pilas de energía conectadas a un sistema de bomba de calor. Dicho sistema provee el 85% del requerimiento de 2700 MWh del calentamiento anual. El desempeño económico de este sistema es excelente, con un costo de energía térmica calculada en 0.06/Wh euros comparada con 0.08/kWh euros de una solución convencional. (Laloui, Di Donna. 2011).

En cuanto a la evaluación de desempeño se concluyó que el 85% de la demanda calentamiento anual (aproximadamente 2700 MWh/año) se reemplazó por la bomba de calor, mientras que una combinación de pilas de energía y un sistema de enfriamiento convencional pudieron satisfacer las demandas anuales de enfriamiento (aproximadamente 1200 MWh/año). En Alemania y Reino Unido se han implementado las pilas de energía en varios edificios en los últimos años (Laloui y Di Donna, 2011):

- Norddeutsche Landesbank en Hannover
- The School Centre en Berlín
- The Main y The Galileo Towers en Frankfurt
- The Centre of Research and Development en Zahnradfabrik Friedrichshafen
- Paddington building 3 en Londres
- Lambeth College en Londres
- The One New Change building en Londres
- Westminster Academy en Londres

2.2. Obtención de los parámetros geotérmicos

En el diseño de pilas de energía, es necesario caracterizar las propiedades índice y mecánicas del suelo para evaluar su comportamiento geotécnico y estructural, así como garantizar un diseño térmico adecuado. Además, se deben conocer las propiedades térmicas del suelo que se describen a continuación:

La difusividad térmica D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es el índice de facilidad con la que el material acepta un cambio de temperatura, cuantitativamente describe la profundidad y velocidad de penetración de una onda de calor en el terreno.

La capacidad calorífica C_c describe la habilidad de un material para almacenar calor. Este valor depende del contenido de agua natural del suelo, así como de su composición y porosidad. Puede expresarse por unidad de masa como capacidad calorífica específica c_{ce} ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$) o por unidad de volumen como capacidad calorífica volumétrica c_{cv} ($\text{J m}^{-3}\text{°C}^{-1}$). Sus valores por lo general se encuentran en un intervalo de 1.5 a 2.5 ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) (Alnefaie *et al.*, 2013).

La conductividad térmica λ ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) es la propiedad que condiciona la eficiencia energética del sistema geotérmico suelo-cimentación-estructura. Dicho parámetro se define como el flujo de calor que es transmitido por conducción a través de una sección transversal en un determinado tiempo, bajo un gradiente de temperatura aplicado en la dirección del flujo de calor. La conductividad térmica del suelo está en función de la composición mineralógica, porosidad, grado de saturación, contenido de agua y temperatura (Moel *et al.*, 2010). Los valores de conductividad térmica en suelos secos para gravas y arenas son de 0.4 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) y en arcillas y limos de 0.5 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) típicamente. Mientras que en suelos saturados sus valores típicos pueden llegar a ser de 5 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) para arenas y 2.3 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) en arcillas (Dalla Santa *et al.*, 2020). Matemáticamente se expresa con la ecuación 2.1:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

donde q es el flujo de calor por unidad de tiempo, λ la conductividad térmica y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura a través del medio conductor. El signo negativo indica que el flujo de calor va de menor a mayor temperatura.

Existen métodos descritos en las normas ASTM para la obtención de la conductividad térmica en laboratorio e *in situ*. Los métodos de laboratorio más utilizados son: el método de la aguja térmica simple y el método de la aguja térmica doble. El método de la aguja térmica doble consiste en un equipo con dos sondas colocadas a una corta distancia entre sí. Una de las sondas emite pulsaciones de calor y la otra se encarga de medir la

temperatura, se mide la capacidad calorífica mediante la medida del máximo aumento de temperatura a una distancia conocida de la fuente de calor. Con este método se puede obtener directamente la capacidad calorífica volumétrica y la difusividad térmica. Al conocer la densidad del material es posible calcular la conductividad térmica. Cabe mencionar que el método de la aguja térmica doble no tiene una regulación ASTM, sin embargo, es un método aceptado por la comunidad científica.

Uno de los métodos más estudiados en los últimos años para conocer los parámetros geotérmicos del suelo son los Ensayos de Respuesta Térmica (Thermal Response Test, TRT). Esta prueba *in situ* requiere de condiciones específicas para su correcta operación y de esta manera obtener resultados más confiables. Se requiere configurar el software del sistema correctamente y reducir las influencias externas (fluctuaciones de voltaje y el tiempo atmosférico) que puedan ocasionar errores en las mediciones. Es importante señalar que, diversos autores recomiendan tiempos de ejecución de la prueba con un mínimo de 48 horas. Lo anterior con la finalidad de garantizar mejores resultados (Sanner *et al.*, 2005). Los resultados de la prueba nos proporcionan valores del calor total transportado en el subsuelo. En la Figura 2.9 se muestran los componentes del equipo para la prueba TRT, donde T1 es la temperatura de entrada y T2 la de salida del fluido.

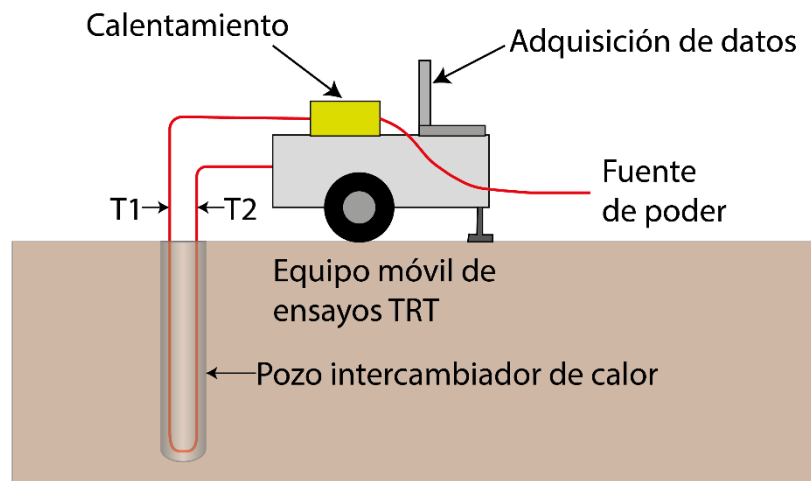


Figura 2.9. Esquema de prueba TRT (adaptado de Sanner, *et al.*, 2005)

Los resultados de esta prueba se presentan en una curva de temperatura para la inyección o extracción de calor según sea el caso, la inclinación de la curva se determina con la siguiente ecuación (Eklöf y Gehlin, 1996):

$$k = \frac{Q}{4\pi H \lambda_{eff}} \quad (2.2)$$

donde k es la Inclinación de la curva de temperatura contra el tiempo (log), Q el calor de inyección/extracción, H la longitud del pozo intercambiador de calor y λ_{eff} es la

conductividad térmica efectiva. Por lo que, la ecuación para calcular la conductividad térmica efectiva queda expresada como:

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi Hk} \quad (2.3)$$

En la Figura 2.10 se muestran fotografías de una prueba TRT realizada al noreste del Estado de México (Rivera-Martínez. 2021). En dicha figura se presenta el equipo empleado para la realización de la prueba:



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.10. (a) Fotografía de la prueba de respuesta térmica (TRT) en el sitio de estudio, (b) pozo de prueba, (c) pantalla de monitoreo de temperaturas, presiones y flujo y (d) pozo de observación (Rivera-Martínez. 2021)

2.3. Pruebas de carga en pilas de energía

La operación de un sistema intercambiador de calor con la naturaleza de las pilas de energía tiene implicaciones importantes que hay que considerar. Por ejemplo, las expansiones y contracciones producidas por los ciclos térmicos durante la vida útil del sistema pueden generar problemas de estabilidad y/o funcionalidad. Así, uno de los

aspectos más importantes a considerar es la realización de estudios experimentales que ayuden a evaluar el efecto de los cambios de temperatura en el comportamiento mecánico de la cimentación. Entre estos estudios experimentales destacan las pruebas de carga *in situ*, ya que proporcionan una visión más completa del comportamiento termo-mecánico de la cimentación.

Las pruebas de carga en condiciones no isotérmicas se realizan de manera similar a las pruebas de carga convencionales en pilas o pilotes. La principal diferencia radica en que contiene embebida una tubería de polietileno de alta densidad con la que se aplican ciclos térmicos durante la colocación de la carga mecánica. El elemento contiene instalados instrumentos de medición de desplazamiento y temperatura que pueden ser; termistores, extensómetros o cables de fibra óptica. Estos últimos tienen la ventaja de poder monitorear los perfiles continuos de esfuerzo y temperatura, lo que permite la evaluación de la respuesta termo-mecánica al aplicar carga axial en cada uno de los estratos superficiales que están en contacto con la pila de energía. Sin embargo, requieren un proceso más delicado de operación, mientras que los sensores de temperatura y desplazamiento antes mencionados funcionan de manera simple y arrojan una lectura puntual a la profundidad en que sean colocados.

Cabe mencionar que, las pilas como sistema de cimentación actúan siempre en conjunto y el comportamiento de un grupo es distinto al de una sola pila. Por lo tanto, se tienen que considerar los efectos de las variaciones de temperatura para una pila aislada y para un conjunto de pilas. Mimouni y Laloui (2014) evaluaron la respuesta de una pila sin restricción en la cabeza y contenida en un grupo de pilas por medio de una losa. Rotta Loria y Laloui (2020) estudiaron los efectos de calentar todas las pilas como un grupo. Calentar todas las pilas en grupo duplicó el grado de libertad y llevó a una mayor elevación a la pila, sin embargo, esto también generó desplazamientos diferenciales pequeños y sus esfuerzos asociados (Loveridge *et al.*, 2020).

Bouazza *et al.* (2016). presentaron el único estudio sobre una pila de energía que utilizó una celda de Osterberg incrustada en la punta para medir los esfuerzos cortantes laterales y la capacidad de carga de forma independiente. Se utilizaron una amplia gama de instrumentación en las pilas, incluidos sensores de fibra óptica para cambios de temperatura, extensómetros de cuerda vibrante y sensores de fibra óptica para cambios de esfuerzo axial y radial, así como celdas de carga para cambios de presión axial.

2.4. Comportamiento termo-mecánico de pilas de energía

Las pilas convencionales están sujetas a distintas cargas mecánicas, principalmente, a la carga del edificio. Al soportar el peso propio de la superestructura, el elemento reaccionará con una deformación proporcional a su magnitud. Este valor está en función del tipo de suelo y la forma de trabajo de la cimentación (punta o fuste). La diferencia entre las pilas de energía y las pilas convencionales es la aplicación de ciclos térmicos

sucesivos que producen la expansión/contracción del elemento, lo que se traduce en esfuerzos y deformaciones adicionales. La magnitud y distribución de estas deformaciones es función del cambio de temperatura (ΔT) y del coeficiente de expansión térmico del material (α):

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (2.4)$$

donde ε_T es la deformación inducida térmicamente. Si se supone que la pila no se encuentra confinada por el suelo, la elongación térmica está definida por:

$$\Delta L = L * \varepsilon_T = L\alpha\Delta T \quad (2.5)$$

Por otra parte, si los dos extremos del elemento se encuentran completamente restringidos, la deformación inducida térmicamente se vuelve cero. Así, al limitar el desplazamiento de la pila, se crean esfuerzos térmicos que pueden obtenerse como (Soga y Rui, 2016):

$$\sigma_T = E(\varepsilon_{T-real} - \alpha\Delta T) = E\varepsilon_{T-Rstr} \quad (2.6)$$

donde E es el módulo de Young, ε_{T-Rstr} es la deformación restringida y ε_{T-real} es la deformación debida a los cambios de temperatura. Cuando las deformaciones se encuentren totalmente restringidas ($\varepsilon_{T-real} = 0$) el esfuerzo inducido térmicamente queda definido por (Soga y Rui, 2016):

$$\sigma_T = -E\alpha\Delta T \quad (2.7)$$

En este caso, el signo negativo indica que es un esfuerzo de compresión generado al incrementar la temperatura en la pila. En expansión libre, las deformaciones debidas a los cambios de temperatura se determinan a partir de la ecuación (Soga y Rui, 2016):

$$\varepsilon_{T-real} = \alpha\Delta T \quad (2.8)$$

Si la deformación ε_{T-real} es medida en campo para un valor dado de ΔT , el esfuerzo inducido térmicamente puede estimarse con la ecuación 2.3.

El comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía durante ciclos térmicos (de calentamiento y enfriamiento) es difícil de evaluar, ya que en la realidad el suelo es heterogéneo y discontinuo. Sin embargo, la metodología para evaluar los esfuerzos y deformaciones inducidos térmicamente parte de la suposición de que el suelo es continuo y homogéneo (Soga y Rui, 2016).

2.4.1. Efectos geotécnicos

Cuando se aplica una fase de enfriamiento, la pila se contrae generando esfuerzos de tensión. Dependiendo del nivel de restricción impuesto por el suelo y la superestructura, pueden generarse tensiones en la parte inferior del elemento. En cambio, cuando se aplica una fase de calentamiento, la pila se expande generando esfuerzos de compresión. En este caso, los esfuerzos termo-mecánicos se desarrollan en dirección contraria y la parte superior estará sujeta a incrementos significativos en las cargas de compresión. Rotta-Loria (2019) sugiere que la ecuación general que rige el equilibrio de las pilas de energía se puede definir como sigue:

$$P + \frac{\pi D^2}{4} K_h w(z=0) = W + Q_{s,mob} + Q_{b,mob} = 0 \quad (2.9)$$

donde P es la carga mecánica aplicada, D el Diámetro de la pila, K_h es la rigidez del elemento estructural conectado a la pila, $w(z=0)$ corresponde al desplazamiento vertical en la cabeza de la pila, W es el peso de la pila, $Q_{s,mob}$ la capacidad de carga por fuste y $Q_{b,mob}$ la capacidad de carga por punta. Para distinguir las diferentes respuestas mecánicas de las pilas de energía, sujetas a cargas térmicas y mecánicas, escribimos $Q_{s,mob}$ y $Q_{b,mob}$ en términos de la contribución mecánica y térmica como:

$$Q_{s,mob} = +Q_{s,mob}^m + Q_{s,mob}^{th} \quad (2.10)$$

$$Q_{b,mob} = +Q_{b,mob}^m + Q_{b,mob}^{th} \quad (2.11)$$

donde $Q_{s,mob}$ la capacidad de carga por fuste, $Q_{b,mob}$ la capacidad de carga por punta, $Q_{s,mob}^m$ es la resistencia a la fricción por contribución mecánica, $Q_{s,mob}^{th}$ es la resistencia a la fricción por contribución térmica, $Q_{b,mob}^m$ es la aportación a la punta por carga mecánica y $Q_{b,mob}^{th}$ es la aportación a la punta por carga térmica. Las cargas aplicadas en pilas convencionales producen un desplazamiento en dirección única (vertical). En pilas de energía, este proceso involucra desplazamientos en dirección perpendicular al eje del elemento. En consecuencia, el esfuerzo cortante se moviliza a partir del eje nulo para mantener el equilibrio en el sistema. El eje nulo se define como el plano donde se genera un cambio de sentido en las fricciones generadas en el fuste, es decir, el punto donde la fricción es nula (Rotta *et al.*, 2018). Con base en lo anterior, $Q_{s,mob}^{th}$ puede escribirse como:

$$Q_{s,mob}^{th} = Q_{s,mob,up} + Q_{s,mob,down} \quad (2.12)$$

donde $Q_{s,mob,up}$ y $Q_{s,mob,down}$ son las resistencias a la fricción movilizadas sobre y por debajo del eje nulo, respectivamente. Para pilas de energía de sección cilíndrica con diámetro D y longitud L (Mimouni *et al.*, 2014) se tiene que:

$$Q_{s,mob,up} = \pi D \int_0^{Z_{NP,\tau}} \tau dz \quad (2.13)$$

$$Q_{s,mob,down} = \pi D \int_{Z_{NP,\tau}}^L \tau dz \quad (2.14)$$

donde τ es el esfuerzo cortante. Es importante señalar que, las cargas térmicas y mecánicas, aplicadas en conjunto con magnitudes significativas, pueden ocasionar deformaciones plásticas en el suelo circundante a la pila (Rotta Loria, 2019).

2.4.2. Efectos estructurales

Como se mencionó anteriormente, las cargas termo-mecánicas generan esfuerzos de tensión y compresión en el contacto pila-suelo. Cuando existen restricciones parciales en los extremos del elemento, la deformación térmica restringida ε_{rstr} crece y las deformaciones térmicas observadas ε_0^{th} disminuyen. Este comportamiento reversible del concreto armado debe ser considerado en el diseño estructural de las pilas de energía. Con base en una relación lineal esfuerzo-deformación y valores medios del módulo de elasticidad, la teoría de la termoelasticidad puede describir eficazmente el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía y el suelo que las rodea. De manera unidimensional, esto implica (Laloui *et al.*, 2003).

$$\sigma_0^{th} = E_{EP} \varepsilon_b^{th} = E_{EP} (\varepsilon_0^{th} - \varepsilon_f^{th}) = E_{EP} (\varepsilon_0^{th} + \alpha_{EP} \Delta T) = E_{EP} \alpha_{EP} \Delta T (1 - DOF) \quad (2.15)$$

donde E_{EP} es el módulo de elasticidad de la pila, ε_f^{th} es la deformación bajo condiciones de expansión térmica libre igual a $-\alpha_{EP} \Delta T$, α_{EP} es el coeficiente lineal de expansión térmica de la pila, ΔT es la variación de temperatura aplicada y DOF es el grado de libertad de la pila, igual a $\varepsilon_0^{th} / \varepsilon_f^{th}$

Actualmente, no se dispone de evidencia experimental que corrobore qué magnitudes significativas de cargas térmicas, aplicadas solas o en conjunto con cargas mecánicas, puedan causar fenómenos irreversibles en el concreto armado. No obstante, los fenómenos que pueden caracterizar el comportamiento irreversible de las secciones de concreto sujetas a cargas de magnitudes significativas son: el desarrollo de fisuras y la rotura del acero de refuerzo (Rotta Loria, 2019). Antes de alcanzar la máxima resistencia del concreto, este tiene un comportamiento elástico-lineal. Sin embargo, cuando el concreto se agrieta existe una disminución repentina de la rigidez, por lo que se genera

una redistribución de la carga que va del concreto al acero de refuerzo. En este caso, la deformación axial se obtiene como:

$$\varepsilon_z = \frac{f_{ct}}{E_c} \quad (2.16)$$

donde f_{ct} es la resistencia a la compresión y E_c es el módulo de elasticidad del concreto. A continuación, se muestra la ecuación para calcular la fuerza requerida para agrietar el concreto reforzado (Rotta Loria, 2019):

$$N_{cr} = E_{EP}A_{EP}\varepsilon_z = E_cA_{EP}[1 + \rho_r(n_{cr} - 1)]\frac{f_{ct}}{E_c} = f_{ct}A_{EP}[1 + \rho_r(n_{cr} - 1)] \approx f_{ct}A_{EP} \quad (2.17)$$

donde A_{EP} es el área de la sección transversal de la pila de energía, ρ_r es la relación entre el área de acero longitudinal y la sección transversal igual a A_r/A_{EP} . n_{rc} es la relación de rigidez entre el acero y el concreto que depende de la relación E_r/E_c . E_r es el módulo de elasticidad del acero de refuerzo. Rotta Loria (2019) propuso las siguientes expresiones para calcular la fuerza axial del concreto y del acero al agrietarse:

$$N_{cr,c} = A_c f_{ct} = f_{ct}A_{EP}(1 - \rho_r)f_{ct}A_{EP} \quad (2.18)$$

$$N_{cr,r} = N_{cr} \frac{n_{rc}\rho_r}{1 + \rho_r(n_{rc} - 1)} = f_{ct}A_{EP}n_{rc}\rho_r \quad (2.19)$$

donde A_c es el área del concreto igual a $A_{EP} - A_r$. Después de que el concreto se fisura, sólo el acero de refuerzo contribuye a la resistencia contra el efecto de las acciones. En este caso:

$$E_{EP}A_{EP} = E_rA_r \quad (2.20)$$

$$N = N_r \quad (2.21)$$

$$N_R = f_y\rho_rA_{EP} \quad (2.22)$$

donde N_r es la proporción de la fuerza axial N recibida por el refuerzo, N_R es la resistencia a la fuerza axial, f_y es la resistencia del acero en campo. Es importante señalar que, la respuesta real de las pilas de concreto armado no es del todo como el comportamiento descrito anteriormente, ya que en la vida real las grietas se generan progresivamente y no aparecen de manera abrupta.

2.5. Arreglos de tuberías intercambiadoras de calor

Las tuberías intercambiadoras de calor están hechas usualmente de polietileno de alta densidad (PEAD). Estas tuberías son colocadas en forma de U simple, doble y triple, también es común hacer empleo de tuberías en forma de W y doble W. Recientemente, se ha estudiado la posibilidad de emplear arreglos helicoidales (Park *et al.*, 2015). La elección del arreglo está en función de la eficiencia del sistema. Sin embargo, este parámetro se encuentra limitado por el diseño y construcción de las pilas. Las tuberías deben colocarse junto al acero de refuerzo para evitar la interacción térmica entre ellas. Asimismo, se deben cumplir los requisitos mínimos de refuerzo longitudinal y transversal.

Los sistemas con tuberías en forma de U son los más sencillos y baratos. Su principal desventaja es que, al tener el menor recorrido y área de flujo en la sección transversal de la pila, intercambia menos calor. En cambio, los arreglos en doble y triple U son los que transfieren más calor. No obstante, tienen mayores complicaciones en su operación debido a las pérdidas de presión por la trayectoria del flujo. Además, se requiere una mayor potencia en la bomba para mantener el caudal, y el aprovechamiento en ambos arreglos, respecto a la tubería con arreglo en W (que disipa más calor), no es tan significativo (Gao *et al.*, 2008). En las Figuras 2.11 se presentan diferentes configuraciones para tuberías de conducción de calor.

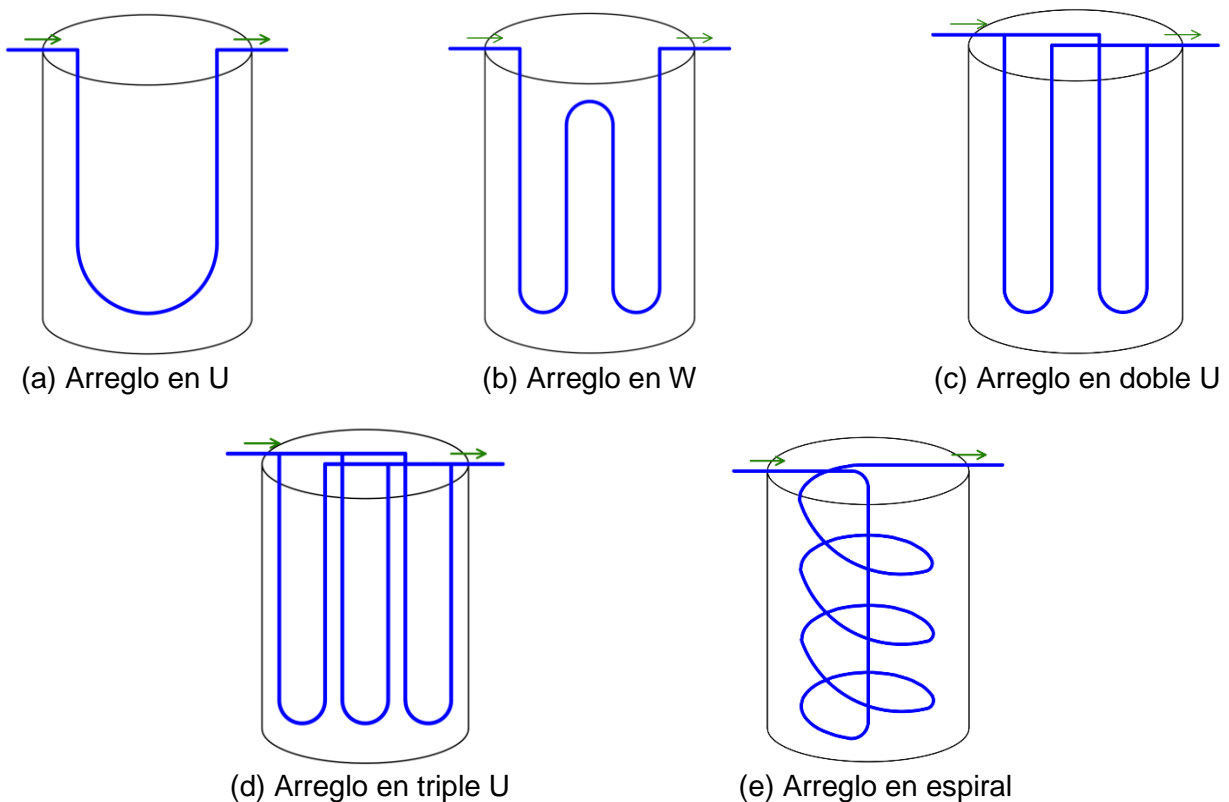


Figura 2.11. Esquema de distintos arreglos de tuberías intercambiadoras de calor (adaptado de Gao *et al.*, 2008)

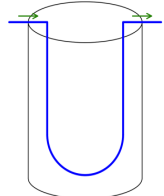
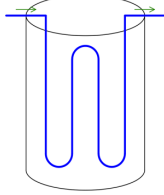
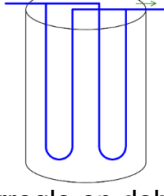
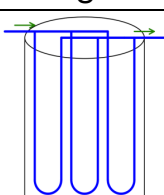
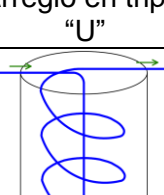
2.6. Clasificación de pilas de energía

En la literatura internacional existen varios ejemplos sobre la implementación de pilas de energía en edificios públicos (Abuel-Naga *et al.*, 2015; Akrouch G. A. 2014; Laloui *et al.*, 2006; Bourne-Webb *et al.*, 2009; Bourne-Webb *et al.*, 2016; Moel *et al.*, 2010, Faizal, *et al.*, 2016.). Además, se han realizado pruebas térmicas y de carga en pilas de energía construidas exclusivamente para el estudio de su comportamiento. Estos ejemplos incluyen elementos con distintos diámetros, configuraciones de tuberías, longitudes y diferentes tipos de suelo. No obstante, el diseño geotécnico y estructural dependerá de las condiciones específicas del caso de estudio. Así, una vez que se propone la geometría y el armado de la pila, se define el arreglo de tuberías que satisfaga los requerimientos térmicos. Finalmente, se verifica que el diseño acoplado cumpla con la demanda energética total o parcialmente, que sea funcional y segura.

Las pilas convencionales se pueden clasificar según la forma en que aportan resistencia (por punta o fuste). En cambio, las pilas de energía se pueden clasificar de acuerdo con la disposición del circuito primario. La Tabla 2.1 presenta la clasificación de las pilas de energía según la configuración de la tubería intercambiadora de calor. Se evalúa la eficiencia, economía y construcción con la finalidad de comparar sus ventajas y ayudar en la selección del elemento más adecuado según las necesidades del proyecto. Se observa que la eficiencia (en este caso refiere a la cantidad de calor que es capaz de transmitir del terreno a la estructura y viceversa) es mayor conforme aumenta el área de tubería en la sección transversal, es decir, mientras más bucles contenga. La economía es inversamente proporcional a la cantidad de calor que es capaz de transmitir, ya que el costo de la tubería aumenta con la cantidad de material. Además, la bomba de calor requiere mayor potencia. Los tiempos de construcción están relacionados con el tipo de arreglo de la tubería, mientras más bucles tenga, la instalación será más complicada.

El arreglo de tuberías en pilas de energía posee un rol importante durante su operación, ya que, al aumentar el área de la sección transversal cubierta por la tubería, su funcionamiento es más eficiente (Soga y Rui, 2016). Además, mientras exista mayor recorrido del fluido dentro de la pila se disipará más calor (Gao *et al.*, 2008). Sin embargo, al tener una mayor longitud de tubería inmersa en las pilas, la bomba de calor requiere mayor potencia para mantener el flujo. Las tuberías con arreglo en U son las más económicas y fáciles de trabajar. Por otra parte, las tuberías con configuraciones dobles o triples incrementan el intercambio de calor. Aunque el arreglo en W es el más eficiente en cuanto a costo-intercambio de calor (Gao *et al.*, 2008).

Tabla 2.1. Cuadro comparativo de las pilas de energía según su arreglo de tubería intercambiadora de calor

Arreglo de tubería	Eficiencia	Economía	Construcción
 <p>Arreglo en "U"</p>	<p>Baja</p> <p>★ ★</p>	<p>Alta</p> <p>★ ★ ★ ★ ★</p>	<p>Sencilla y rápida</p> <p>★ ★ ★ ★ ★</p>
 <p>Arreglo en "W"</p>	<p>Media-alta</p> <p>★ ★ ★ ★</p>	<p>Media-alta</p> <p>★ ★ ★ ★</p>	<p>Complicada y poco rápida</p> <p>★ ★ ★</p>
 <p>Arreglo en doble "U"</p>	<p>Media-alta</p> <p>★ ★ ★ ★</p>	<p>Media-baja</p> <p>★ ★ ★</p>	<p>Complicada y tardada</p> <p>★ ★</p>
 <p>Arreglo en triple "U"</p>	<p>Alta</p> <p>★ ★ ★ ★ ★</p>	<p>Baja</p> <p>★ ★</p>	<p>Muy complicada y tardada</p> <p>★</p>
 <p>Arreglo en espiral</p>	<p>Media-alta</p> <p>★ ★ ★ ★</p>	<p>Media-baja</p> <p>★ ★ ★</p>	<p>Sencilla y poco tardada</p> <p>★ ★ ★ ★</p>

La tasa de transferencia de calor depende de la configuración de la tubería y determina la cantidad de pilas necesarias para satisfacer los requerimientos térmicos. En general, el número de pilas se elige con base en los requisitos estructurales. Sin embargo, la energía térmica provista por el diseño preliminar suele ser menor a la demanda del edificio. Por lo tanto, es importante identificar como se puede mejorar la eficiencia del

sistema utilizando una cantidad limitada de pilas y, en determinados casos, utilizar sistemas híbridos para abastecer el 100% de las cargas térmicas.

El análisis de costos para implementar un sistema de cimentación a base de pilas de energía debe realizarse minuciosamente, ya que existen varios factores que pueden aumentar o reducir el costo final de construcción. Seok Yoon *et al.* (2015) realizaron el análisis de costos de un edificio de 540 m² de área con un sistema de acondicionamiento de espacio basado en pilas de energía. Se propusieron dos configuraciones para las tuberías de conducción, helicoidal y en W. De acuerdo con los autores, las pilas con arreglo helicoidal presentan mayor tasa de intercambio de calor y el edificio requeriría 45 pilas de este tipo para abastecer la demanda de energía. En cambio, si se utiliza un arreglo en W se necesitarían 56 pilas para satisfacer los requerimientos de la edificación. Sin embargo, las pilas con tubería helicoidal son 200 a 250% más costosas debido a que requieren una mayor cantidad de tubería. Por lo tanto, se recomienda utilizar esta solución cuando se tenga un número limitado de elementos o por cuestiones de diseño. Con base en lo anterior, es necesario evaluar la eficiencia de las diferentes configuraciones de pilas de manera individual. A continuación, se presentan las distintas propuestas sobre el arreglo de tuberías para pilas de energía, según los diámetros recomendados en el apartado 3.3.2.

2.6.1. Pila de energía con tubería en U

Entre los distintos arreglos de tuberías, la configuración en U es la más simple. Por lo tanto, en cuestión de material e instalación, es la opción más económica. En la Figura 2.12a se presenta una propuesta de arreglo para una pila de energía de 60 cm de diámetro. La pila contiene una tubería intercambiadora de calor de polietileno de alta densidad con configuración en U ($d=25$ mm), refuerzo longitudinal con varillas ($f_y = 4200$ kg/cm²) del número 4 ($d=12.7$ mm) y estribos del número 2.5 ($d=7.9$ mm). El concreto tiene una resistencia a la compresión f'_c de 250 kg/cm² y se considera un recubrimiento de 10 cm. Este es el espesor mínimo recomendado para una tubería de dos o más bucles. No obstante, el número máximo de bucles para una pila de 60 cm de diámetro es uno. En la Figura 2.12b se muestra de manera análoga la propuesta de arreglo para una pila de energía con tubería en U y 40 cm de diámetro.

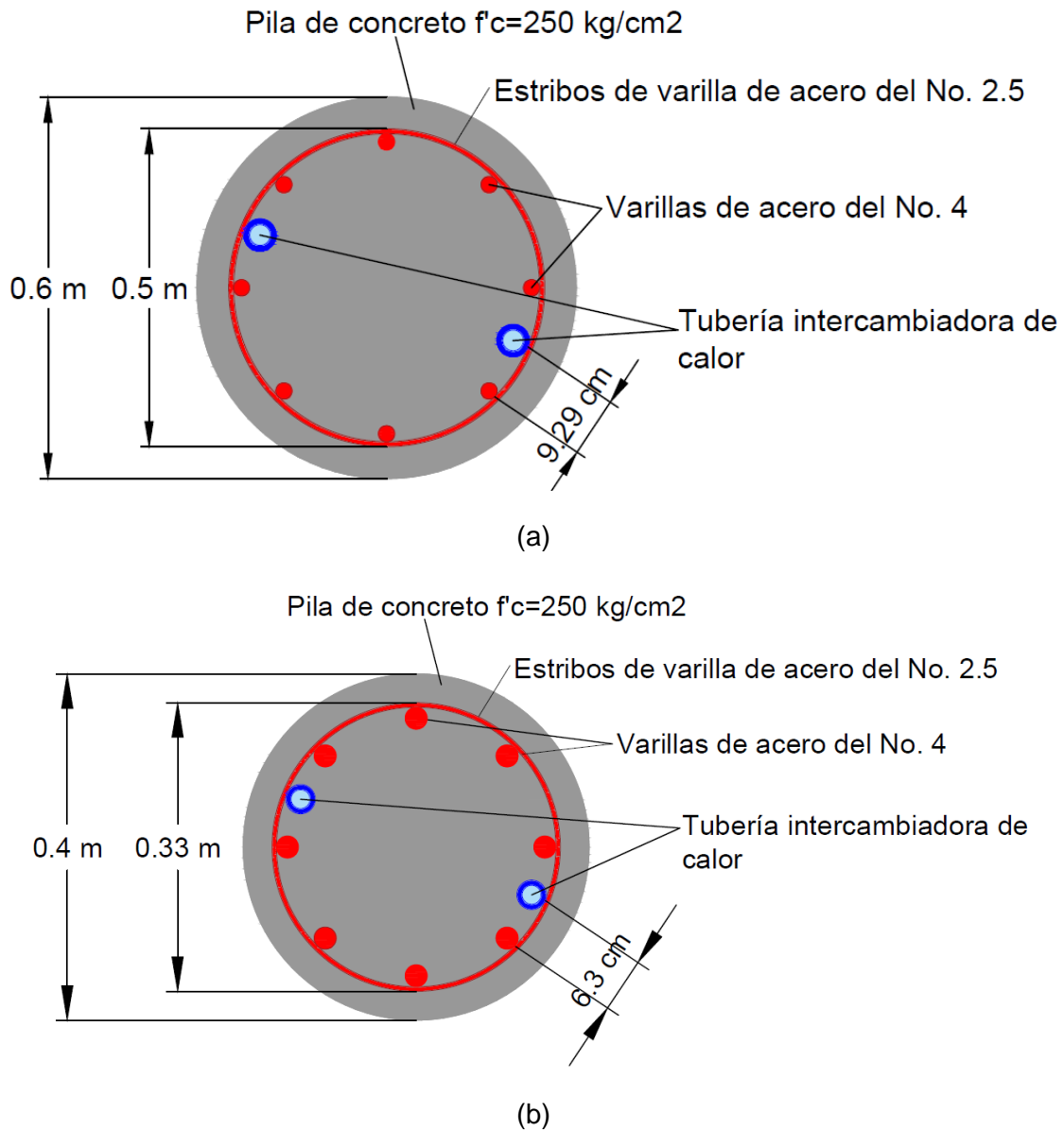


Figura 2.12. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería en U: (a) 60 cm de diámetro y (b) 40 cm de diámetro

En la Figura 2.13a se muestra un esquema de la sección longitudinal de la pila con configuración de tubería en U de 60 cm de diámetro, de 11 m de longitud, donde se observa una separación de estribos mínima de 30 cm. De manera análoga, en la Figura 2.13b se muestra la sección longitudinal de la pila de 40 cm de diámetro con arreglo U simple.

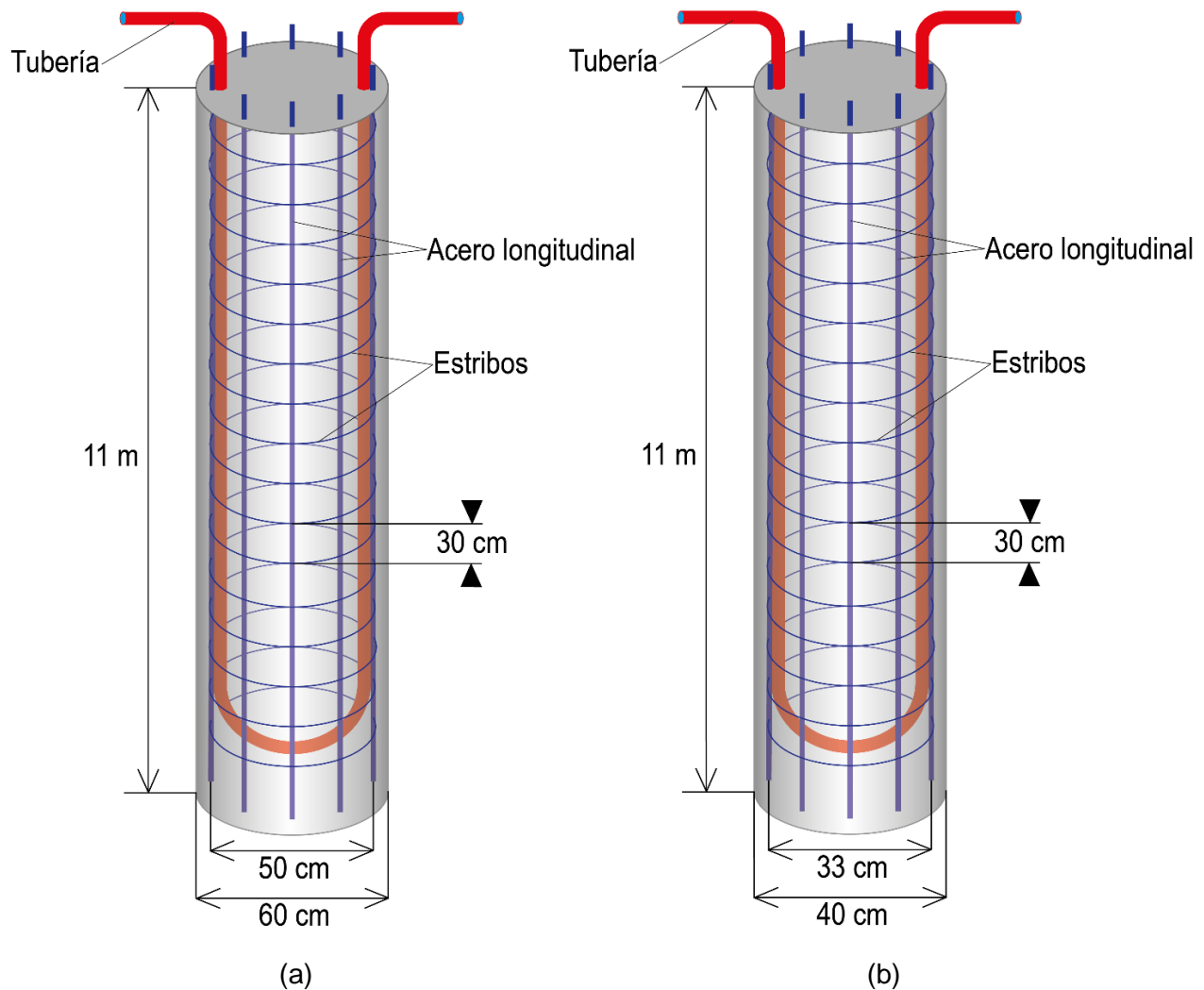


Figura 2.13. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería en U: (a) 60 cm de diámetro y (b) 40 cm de diámetro

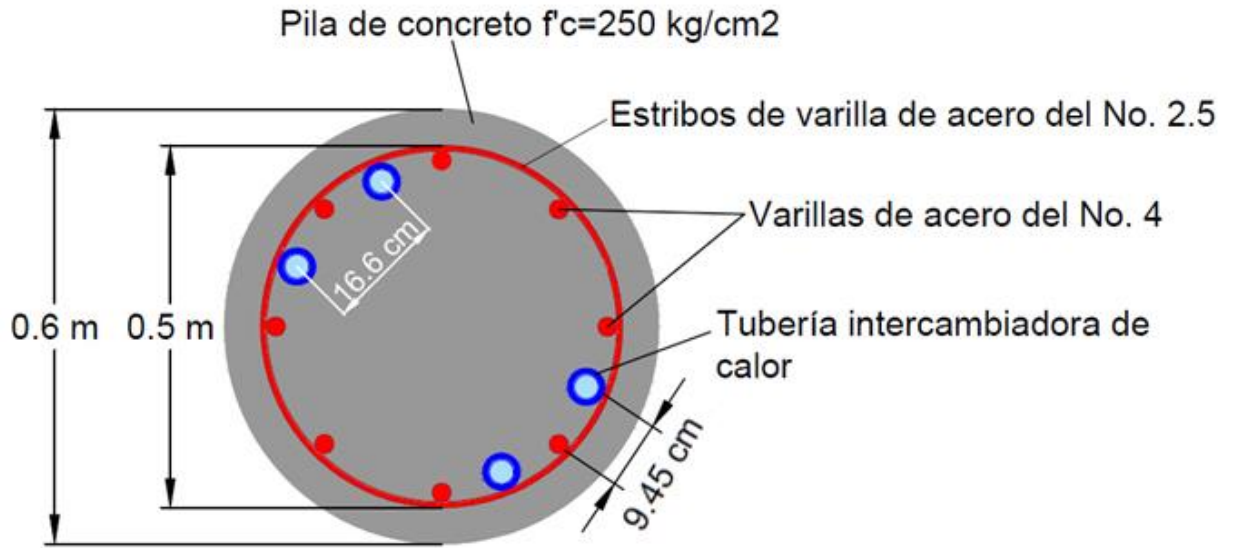
Las pilas de energía con tubería con arreglo en U poseen la menor área transversal y el menor recorrido posible dentro de la pila, por lo que tiene bajo aprovechamiento térmico para suministro o inyección de calor. En contraste, la cantidad de materiales es mínima y su instalación es relativamente sencilla, lo que nos lleva a afirmar que tiene la ventaja de ser la más económica.

Las pilas con tuberías de configuración doble y triple U incrementan el aprovechamiento de energía con respecto a las de arreglo en U. En general, el aprovechamiento es menor al 100% debido a que esta disposición presenta longitudes mayores generando pérdidas por fricción en la tubería. Si bien es correcto afirmar que una pila con dos o tres bucles simples (doble o triple U) tiene mayor intercambio de calor, esto no quiere decir que son más eficientes. Las pérdidas de energía requieren mayor potencia de la bomba de calor, por lo que es importante evaluar la factibilidad de los distintos arreglos en proyecto y sus implicaciones.

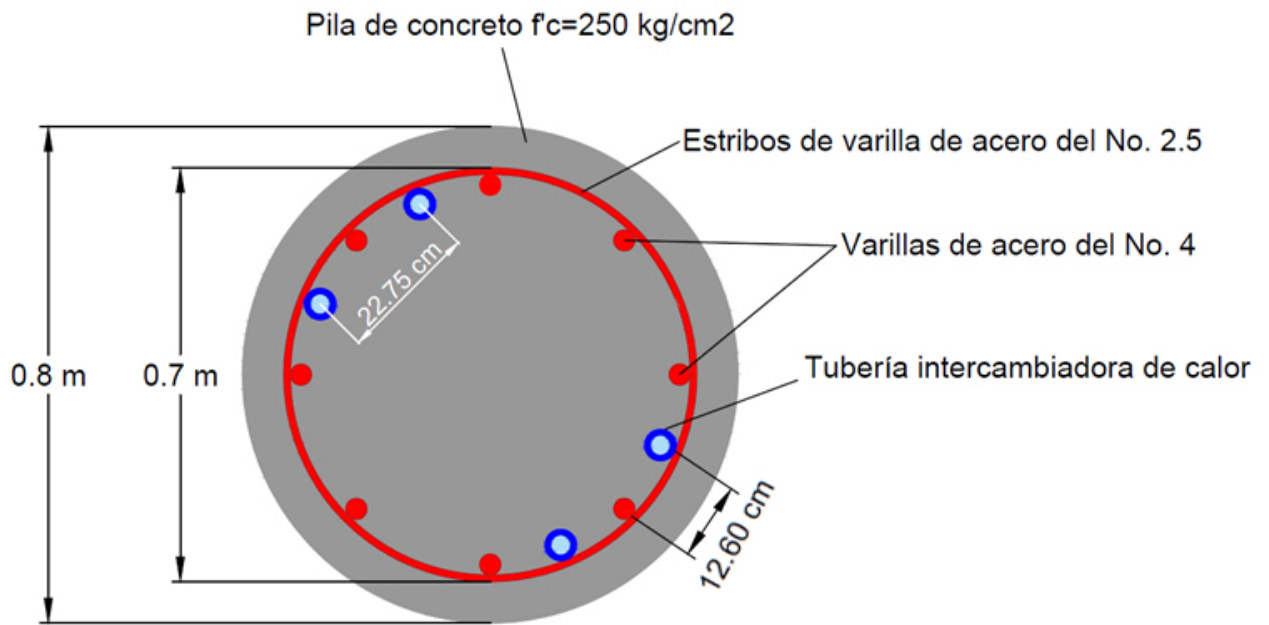
2.6.2. Pila de energía con tubería de dos bucles en U

Las pilas de energía con tuberías en configuración U doble proporcionan mayor intercambio de calor respecto a las de un bucle simple, sin embargo, el fluido conductor de calor debe recorrer una distancia mayor dentro de la tubería del circuito primario. Por lo tanto, existen pérdidas de energía resultantes de la fricción entre la tubería y el fluido. Lo anterior genera una mayor demanda de energía para que el sistema funcione eficientemente. En la Figura 2.14a se muestra la propuesta del arreglo de la sección transversal de una pila de energía de 60 cm de diámetro (recomendación mínima para pilas con doble bucle de tuberías). El refuerzo longitudinal se compone de ocho varillas ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$) del número cuatro ($d=12.7 \text{ mm}$) y estribos del número 2.5 ($d=7.9 \text{ mm}$). La resistencia a la compresión del concreto f'_c es de 250 kg/cm^2 y se considera un recubrimiento de cinco centímetros.

La separación entre ejes de tuberías es de 16.6 cm para evitar la interacción térmica entre ellas, mientras que la separación mínima entre eje de tubería y eje del refuerzo longitudinal es de 9.45 cm. De manera análoga, en la Figura 2.14b se muestra la propuesta del arreglo de una pila de energía con tubería de 80 cm de diámetro con configuración U doble. La distancia entre ejes de tuberías es de 22.75 cm y de eje de tubería a eje del refuerzo longitudinal es de 12.60 cm. Es importante señalar que, la cantidad de acero transversal y longitudinal está dada por los requerimientos particulares de resistencia del proyecto en cuestión, por lo que se debe ajustar el arreglo según sea el caso.



(a)



(b)

Figura 2.14. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería de dos bucles en U. (a) 60 cm de diámetro; (b) 80 cm de diámetro

La Figura 2.15 muestra las secciones longitudinales de las pilas de energía de 60 y 80 cm de diámetro con arreglo U doble. Se detallan las dimensiones del elemento, el refuerzo longitudinal y transversal, así como la disposición de las tuberías del circuito primario.

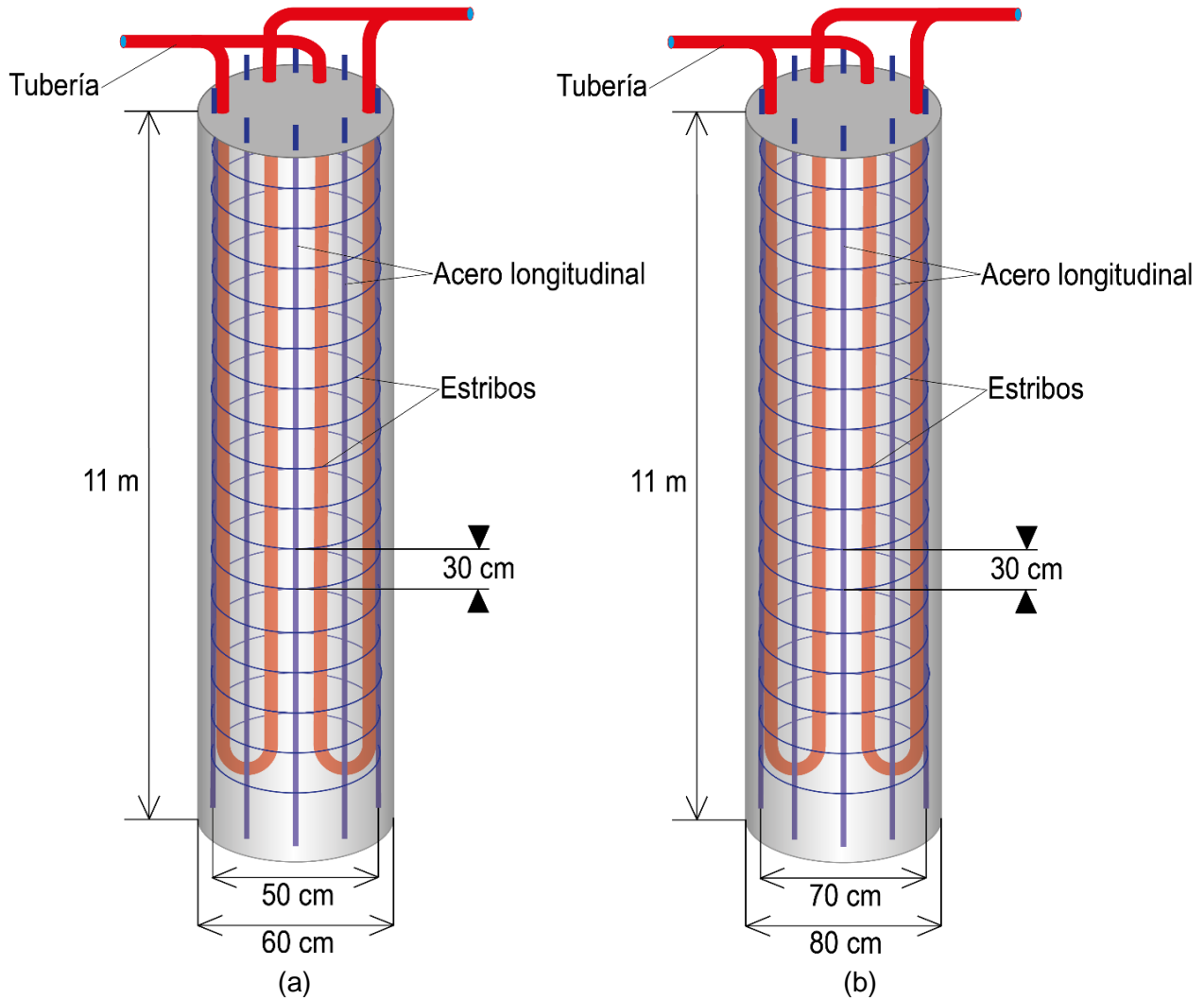


Figura 2.15. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería de dos bucles en U (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro

2.6.3. Pila de energía con tubería de tres bucles en U

Las pilas de energía con tres bucles de tuberías (triple U) transfieren más calor respecto a las simples, dobles y en W. Sin embargo, al tener mayor longitud de tubería, la pérdida de energía por fricción aumenta. En consecuencia, se requiere mayor potencia de la bomba y suministro de energía eléctrica. La Figura 2.16 muestra la sección transversal y longitudinal de la pila de energía de 80 cm de diámetro con disposición en triple U. El armado consiste en ocho varillas ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$) del número cuatro ($d=12.7 \text{ mm}$) y estribos del número 2.5 ($d=7.9 \text{ mm}$). La separación mínima entre ejes de tuberías es de

22.75 cm para evitar la interacción térmica entre ellas, la separación entre el eje del acero longitudinal y la tubería es de 12.60 cm. La resistencia a la compresión del concreto f'_c es de 250 kg/cm² y el recubrimiento se considera de cinco centímetros. La Figura 2.16b muestra la sección longitudinal de la pila de energía con tres bucles de tuberías (triple U) y diámetro de 80 cm (diámetro mínimo recomendado para pilas con triple U). Se detallan las dimensiones del elemento, el refuerzo longitudinal y transversal, así como la disposición de las tuberías del circuito primario.

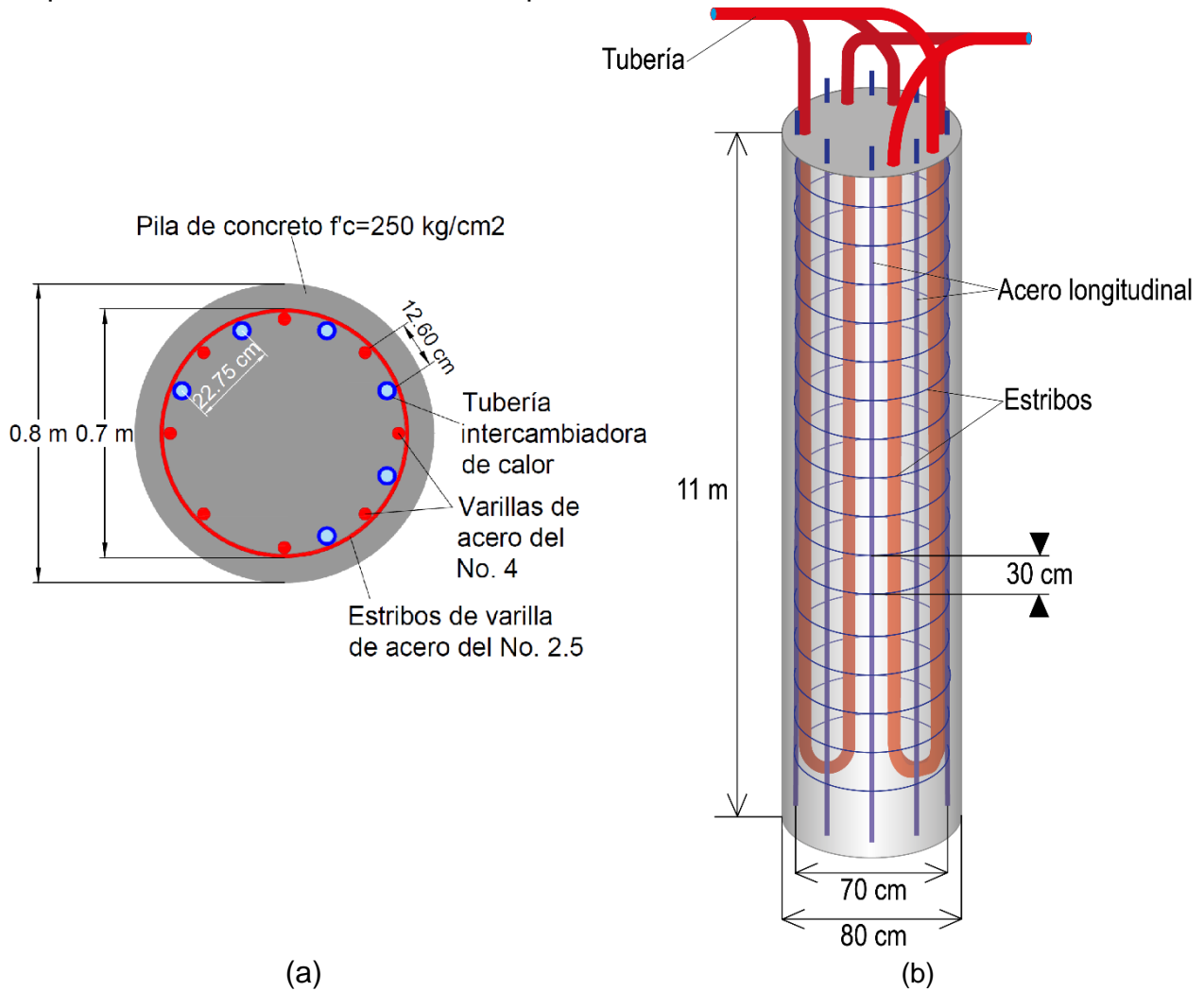


Figura 2.16. Esquema de la pila de energía con tubería de tres bucles en U: (a) Sección transversal; (b) Sección longitudinal

2.6.4. Pila de energía con tubería en W

Según Gao *et al.* (2008) las principales ventajas de las pilas de energía con tuberías en W son: economía, facilidad de instalación y eficiencia energética. En la Figura 2.17a se presenta la sección transversal de la pila de energía de 60 cm de diámetro (diámetro mínimo para pilas de energía con este tipo de configuración). En el corte se muestra el refuerzo longitudinal compuesto por ocho varillas (f_y de 4200 kg/cm²) del número cuatro ($d=12.7$ mm) y estribos del número 2.5 ($d=7.9$ mm). La separación mínima entre ejes de tuberías (considerando tanto entrada y salida como el bucle) es de 16.6 cm para evitar la interacción térmica entre ellas, la separación entre el eje del acero longitudinal y la tubería es de 9.45 cm. La resistencia a la compresión del concreto f'_c es de 250 kg/cm² y el recubrimiento se considera de cinco centímetros. Por otra parte, en la Figura 2.17b se presenta la propuesta de arreglo para una pila de energía con configuración en W de 80 cm de diámetro.

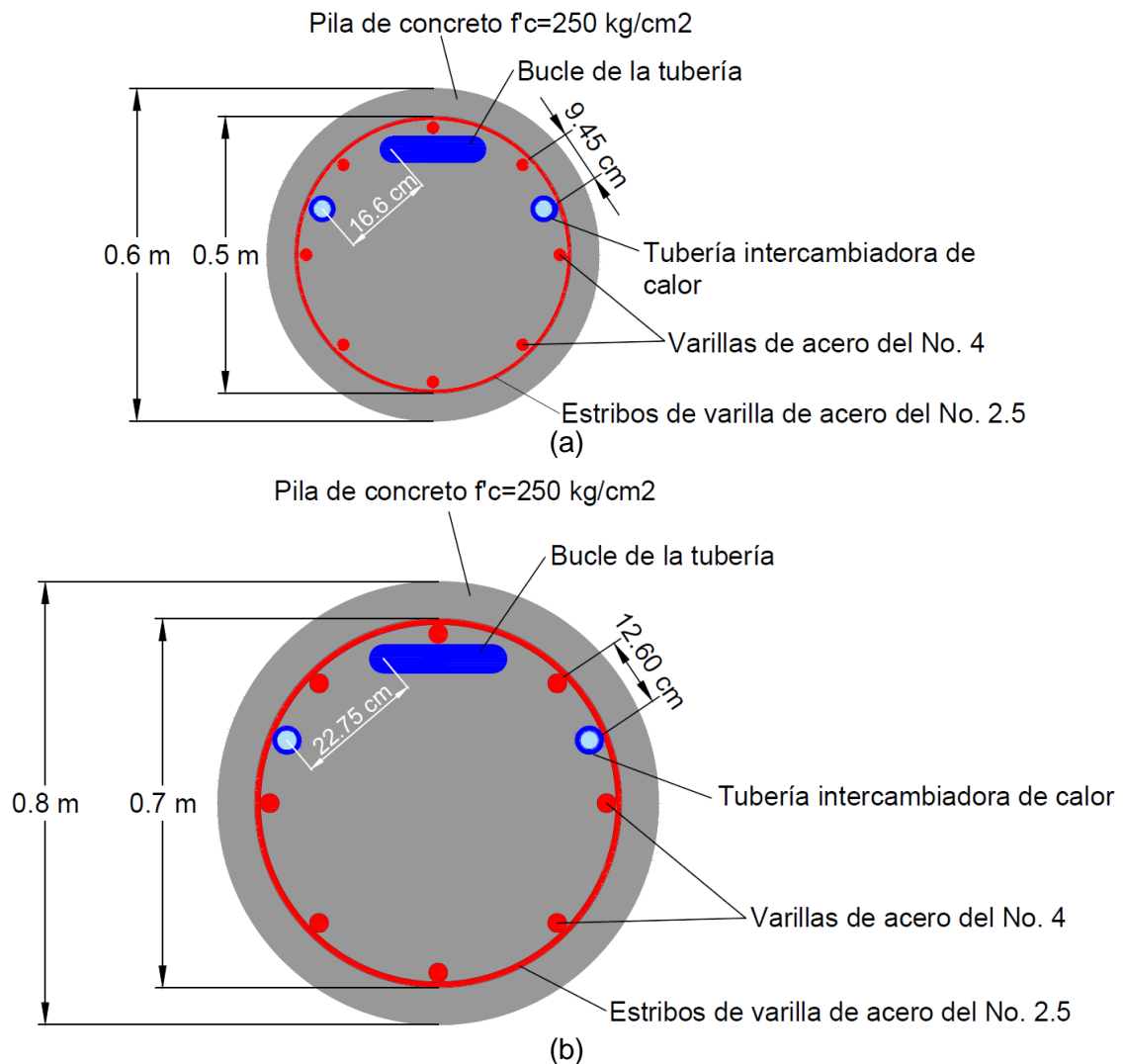


Figura 2.17. Detalle de la sección transversal de la pila de energía con tubería en doble W: (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro

En la Figura 2.18 se muestran las secciones longitudinales de las pilas de energía de 60 y 80 cm de diámetro con configuración en W. Se detallan las dimensiones del elemento, el refuerzo longitudinal y transversal, así como la disposición de las tuberías del circuito primario.

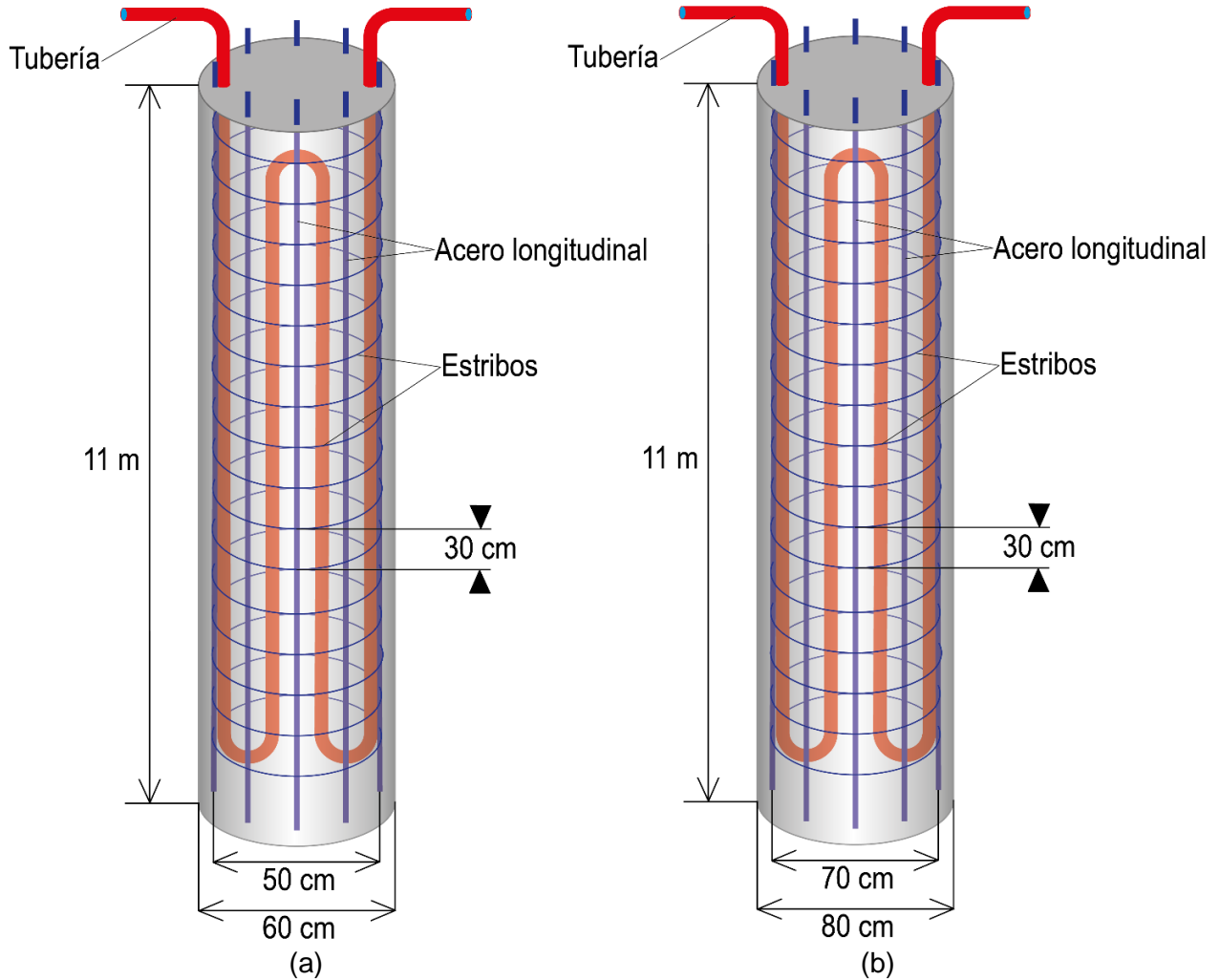


Figura 2.18. Esquema longitudinal de pila de energía con tubería en W: (a) 60 cm de diámetro y (b) 80 cm de diámetro

2.6.5. Pila de energía con tubería helicoidal

La principal ventaja de las pilas de energía con configuración helicoidal es que, la longitud de la tubería es mayor respecto a otros arreglos, lo que incrementa la productividad del sistema. Así, es importante considerar el espaciamiento entre bucles ya que el intercambio de calor es inversamente proporcional a la separación entre las tuberías. Sin embargo, si la distancia considerada es muy corta puede haber interferencia térmica en ellos. La Figura 2.19 muestra la sección transversal y longitudinal de la pila de energía de 60 cm de diámetro con configuración helicoidal. Se detallan las dimensiones del elemento, el refuerzo longitudinal y transversal, así como la disposición de las tuberías del circuito primario. El acero de refuerzo consiste en ocho varillas ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$) del número cuatro ($d = 12.7 \text{ mm}$) y estribos del número 2.5 ($d = 7.9 \text{ mm}$).

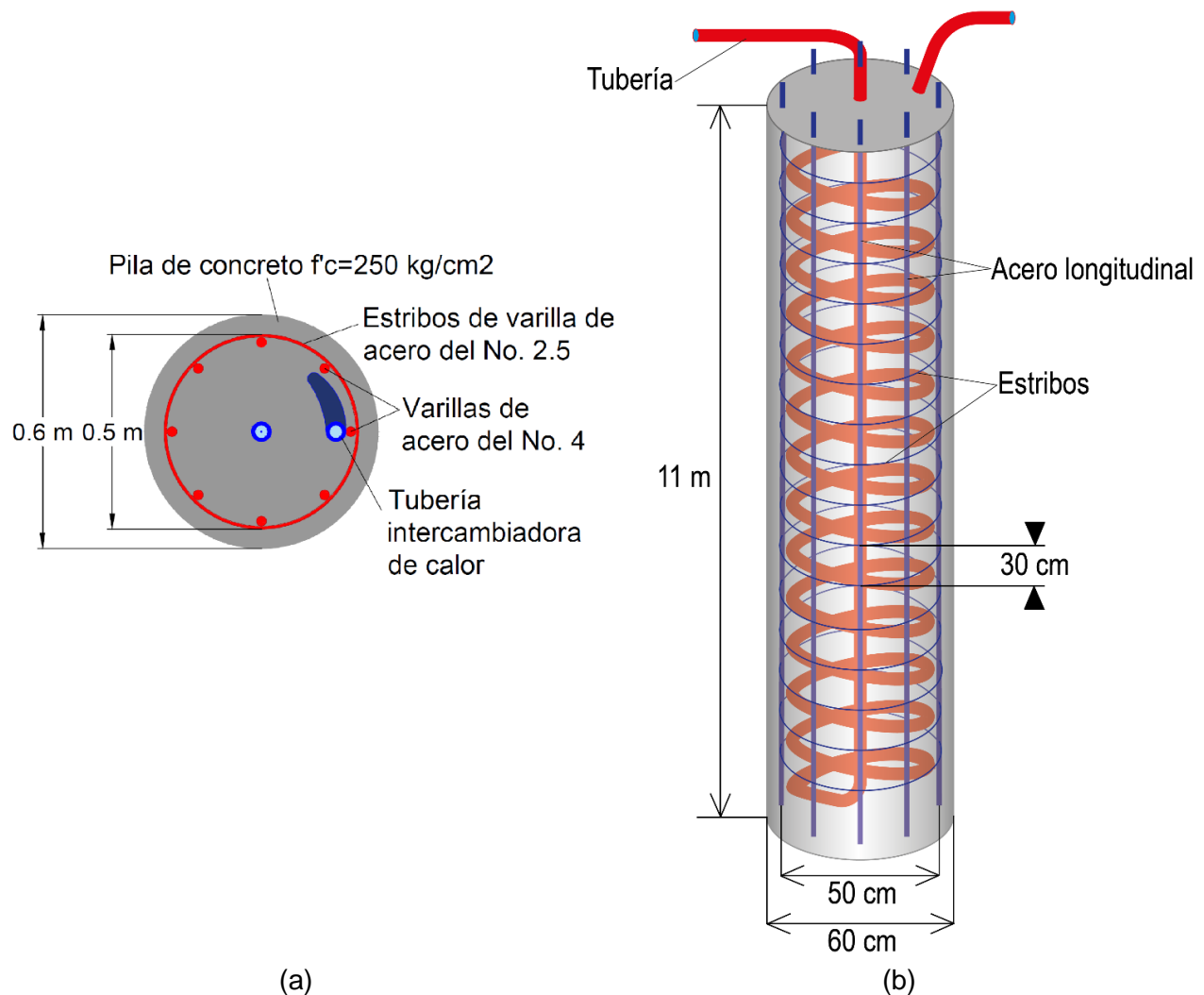


Figura 2.19. Esquema de la pila de energía con tubería helicoidal: (a) Sección transversal; (b) Sección longitudinal

2.7. Eficiencia de pilas de energía

La eficiencia de las pilas de energía varía en función de distintos parámetros, como lo son el tipo de suelo y sus parámetros térmicos, la geometría de las pilas, el material de las tuberías, etc. Sin embargo, un factor determinante y que podemos controlar desde el punto de vista de los requerimientos térmicos, es la configuración del circuito primario. De manera general, se puede afirmar que la cantidad de intercambio de calor es proporcional a la longitud de las tuberías y a la cantidad de pilas incorporadas al sistema. No obstante, existen aspectos que afectan la eficiencia térmica del sistema. Por ejemplo, la fricción generada por el fluido al recorrer las tuberías y la interferencia térmica entre tuberías que no tienen el espaciamiento adecuado.

2.8. Soluciones analíticas para el análisis térmico de intercambiadores de calor

Para realizar el análisis térmico de las pilas de energía, existen métodos analíticos que pueden ser aplicados a distintas configuraciones de tuberías intercambiadoras de calor (Li *et al.*, 2016). La transferencia de calor dentro de un pozo depende principalmente de la configuración de los canales de flujo, las propiedades térmicas de los materiales y el suelo circundante. Este proceso térmico local consta de tres componentes:

- I. Transferencia de calor por convección entre el fluido en circulación y la superficie interior de los tubos en U.
- II. Transferencia de calor por conducción a través de la pared del tubo en U.
- III. Transferencia de calor por conducción a través del material de relleno.

La resistencia térmica asociada con los dos primeros procesos se denomina resistencia térmica de la tubería R_p y se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_i h} \quad (2.23)$$

donde k_p es la conductividad térmica de la tubería en configuración de U simple ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), r_o y r_i son los radios exterior e interior de la tubería respectivamente y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W m}^{-2}\text{K}$).

Los modelos analíticos desarrollados para evaluar la transferencia de calor de las pilas de energía se basan en los siguientes supuestos (Li *et al.*, 2016):

- I. Se supone que el suelo es un medio infinito o semi-infinito, dependiendo de si se considera o no la influencia de la superficie.
- II. El suelo tiene una temperatura inicial uniforme (temperatura del suelo efectiva, sin perturbaciones). Si se considera la superficie, esta temperatura inicial puede emplearse como condición de frontera de temperatura constante.

- III. La condición de frontera de la pared del pozo o tubería intercambiadora de calor es flujo o temperatura constantes, siendo más conveniente la de flujo constante.
- IV. Si el efecto de la filtración del flujo subterráneo no se puede ignorar, se supone que el flujo es homogéneo y paralelo a la superficie.
- V. Aunque el suelo es normalmente estratificado y heterogéneo, se supone como un medio con una conductividad térmica equivalente $k_{s,e}$. Existen varias expresiones para calcular $k_{s,e}$ (Bear, 1972). Por ejemplo, para un medio estratificado horizontalmente:

$$k_{s,e} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N b_i} \sum_{i=1}^N k_{s,i} b_i \quad (2.24)$$

donde $k_{s,i}$ y b_i son la conductividad térmica y el espesor de la “iésima” capa del terreno, respectivamente y N es el número total de estratos. Bear (1972) propuso una expresión para el suelo estratificado en una dirección arbitraria:

$$k_{s,e} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N b_i} \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{k_{s,i}} \quad (2.25)$$

Los modelos para la transferencia de calor de un pozo intercambiador de calor están basados en el trabajo de Ingersoll *et al.* (1954). Dichos autores presentaron un modelo de fuente lineal infinita (ILS) y un modelo de fuente cilíndrica infinita para la transferencia de calor a través de tuberías embebidas. En su trabajo desarrollaron algunas metodologías de análisis como el método de imágenes de fuentes de calor utilizado para explicar la influencia de la superficie del suelo, el método de la fuente de calor en movimiento para determinar el efecto del agua subterránea y el principio de superposición para abordar el problema de las tasas de calentamiento variables. También discutieron temas relevantes como el efecto de la formación de hielo, la transferencia de humedad, la recuperación de temperatura y el almacenamiento de calor. Posteriormente, las ideas sugeridas por Ingersoll *et al.* (1954) se ampliaron a los análisis de intercambiadores de calor.

La forma convencional en la que se descomponen los procesos térmicos de un pozo intercambiador de calor es en términos del radio del pozo (Hellström, 1991): Se supone que el proceso en el pozo se encuentra en un estado de flujo constante (o estado casi estacionario), que puede ser descrito por la resistencia térmica efectiva del pozo (R_b). El proceso fuera del pozo depende del tiempo y está representado por una función G (Ingersoll *et al.*, 1954). La Tabla 2.2 presenta algunas funciones G típicas.

Los modelos teóricos se pueden dividir en bidimensionales y cuasi tridimensionales. Hellström (1991) presentó dos modelos bidimensionales para R_b , uno derivado de la

suposición de fuente lineal en estado estacionario y otro basado en un método multipolar. La diferencia entre ellos radica en la variable adimensional h (ver Tabla 2.2). Si se utiliza el modelo de fuente lineal en estado estacionario para una pila con tubería en U, h es igual a 0. En cambio, si se aplica el método multipolar, h se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\left[\frac{r_0}{2D} \left(1 - \frac{4\sigma D^4}{r_b^4 - D^4}\right)\right]^2}{\frac{1 + 2\pi k_b R_p}{1 - 2\pi k_b R_p} + \frac{r_0^2}{4D^2} \left[1 + \frac{16\sigma D^4 r_b^4}{(r_b^4 - D^4)}\right]} \quad (2.26)$$

donde D es la mitad del espacio entre las patas de la tubería en U. La variable adimensional s se define como $(k_b - k_s)/(k_b + k_s)$ y k_s y k_b denotan las conductividades térmicas del suelo y materiales de relleno, respectivamente.

Tabla 2.2. Modelos para el cálculo de R_b para tuberías intercambiadoras de calor con configuración de U simple

		Expresiones para R_b	Comentarios
Modelos empíricos	Modelos bidimensionales	$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln\left(\frac{r_b}{r_p} \sqrt{\frac{r_p}{D}}\right)$	Esta expresión es empleada para pozos intercambiadores de calor con tubería con configuración de U simple. También se deriva de la suposición de diámetro equivalente (Gu y O'Neal, 1998).
		$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln\left(\frac{r_b}{\sqrt{n} r_p}\right)$	Esta expresión se deriva de la suposición de diámetro equivalente; n denota el número de tuberías inmersas en la pila de energía (Shonder y Beck, 1999).
		$R_b = \frac{1}{\beta_0 k_b (r_b/r_p)}$	Esta expresión utiliza el concepto de factor de forma. Los coeficientes empíricos se obtienen ajustando datos experimentales (Paul, 1996).
Modelos teóricos		$R_b = \frac{1}{4\pi k_b} \left\{ \ln \left[\frac{r_b^2}{2Dr_0} \left(\frac{r_b^4}{r_b^4 - D^4} \right)^\sigma \right] - \eta \right\} + \frac{R_p}{2}$	La influencia de k_s está representada por la razón adimensional σ . η es igual a 0 o se calcula a partir de la ecuación 2.9 (Hellström, 1991).
	Modelos cuasi-tridimensionales	$R_b^* = R_b + \frac{1}{3R_a} \left(\frac{H}{C_f V_f}\right)^2$	Esta expresión se obtiene suponiendo un flujo de calor uniforme en la pared del pozo.

			C_f y V_f son el calor específico volumétrico y el caudal del fluido. R_a está dado por Hellström (1991).
		$R_b^* = R_b \eta \coth(\eta), \eta$ $= \frac{H}{C_f V_f} \frac{1}{2R_b} \sqrt{1 + \frac{4R_b}{R_{12}^A}}$	Esta expresión se obtiene suponiendo una temperatura uniforme en la pared del pozo. R_b se obtiene mediante un modelo bidimensional; los detalles del RD ₁₂ se pueden encontrar en Hellström (1991).
		$R_b^* = \frac{H}{C_f V_f} \left(\frac{T_{f,i} - T_b}{T_{f,i} - T_{f,0}} - \frac{1}{2} \right)$	$T_{f,0}$ es la temperatura de salida del fluido obtenida al resolver ecuaciones de energía para tuberías en U (Zeng <i>et al.</i> , 2003).

2.8.1 Fuente lineal infinita

Este método se refiere a la solución de la transferencia radial de calor por conducción, involucrando una fuente lineal infinita (cilindro de diámetro tan pequeño que es despreciable) que inicia generando calor continuamente a partir de un tiempo cero. Ingersoll *et al.* (1948) y Carslaw *et al.* (1959) desarrollaron una solución que proporciona la temperatura T a partir de un radio r , como se muestra a continuación:

$$T = T_g + \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi k} * E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \tag{2.27}$$

donde E_1 es la integral exponencial, T_g es la temperatura inicial del medio (°C), q es la carga calorífica específica (Wm^{-1}), k es la conductividad térmica del medio homogéneo ($Wm^{-1}K^{-1}$), α es la difusividad térmica del medio homogéneo (m^2s^{-1}), r es la distancia radial desde la fuente lineal (m) y t es el tiempo en el que se aplica la fuente lineal continua (s).

Gautschi *et al.* (1964) propusieron una serie de expansión de la integral exponencial como:

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{nn!} \tag{2.28}$$

Carslaw *et al.* (1959) presentaron una forma simplificada para valores grandes de t :

$$T = T_g + \frac{q}{4\pi k} * \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right) \quad (2.29)$$

Con un error máximo en el aumento de temperatura del 2%, cuando $t > 5r^2/\alpha$. Con estas aproximaciones, la respuesta de temperatura a un pulso constante de calor queda definida por:

$$T_f = T_g + \frac{q}{4\pi k^*} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) + qR_b^* \quad (2.30)$$

donde T_f es la temperatura media del fluido dentro del pozo ($^{\circ}\text{C}$), T_g es la temperatura del suelo inalterada ($^{\circ}\text{C}$), k es la Conductividad térmica efectiva del suelo ($\text{W m}^{-1}\text{k}^{-1}$) y R_b es la resistencia térmica efectiva del pozo ($\text{K W}^{-1}\text{m}^{-1}$).

2.8.2 Fuente cilíndrica infinita

Es la solución a un proceso de transferencia de calor radial, desde un cilindro hueco rodeado de un medio infinito, en el cual la transferencia de calor ocurre por conducción pura. Este método propuesto por Ingersoll *et al.* (1954) considera un cilindro infinito que genera calor continuamente a partir del tiempo cero. Las soluciones varían respecto al material del que esté hecho el cilindro y se describen a continuación:

- El interior del cilindro está vacío, con todo el flujo de calor saliendo del radio del cilindro (Carslaw y Jaeger, 1959). Una solución similar se puede encontrar en Ingersoll *et al.* (1951).
- El interior del cilindro es un conductor perfecto con una capacitancia térmica específica (Carslaw y Jaeger, 1959). Esta forma se analiza como una buena aproximación para las pruebas de aguja térmica utilizadas para medir la conductividad térmica.
- Una forma que trata regiones cilíndricas compuestas donde el interior del cilindro tiene propiedades térmicas diferentes a las del suelo circundante (Carslaw y Jaeger, 1959).

Empleando la primera hipótesis, la solución está dada por la siguiente ecuación:

$$T_f = T_g + \frac{q}{k^*} G(F_0) + qR_b^* \quad (2.31)$$

donde F_0 es el número de Fourier ($\alpha t/r_b^2$) y $G(F_0)$ puede obtenerse como:

$$G(F_0) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} (e^{-\beta^2 F_0} - 1) + \frac{J_0(\beta)Y_1(\beta) - Y_0(\beta)J_1(\beta)}{\beta^2(J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta))} \delta\beta \quad (2.32)$$

Cooper (1976) y Bernier (2001) sugirieron las formas simplificadas de la ecuación 2.32, sin necesidad de integrarla (Spitler *et al.*, 2020).

2.8.3 Fuente lineal finita

Cuando se requiere calcular la transferencia de calor para periodos mayores a un año, se recomienda emplear el modelo de fuente lineal finita. Esta solución proporciona la temperatura en un punto (r, z) resultante de una tasa de transferencia de calor constante por unidad de longitud q que se origina en una línea finita de longitud H ubicada a una distancia D de la superficie del suelo. Para una temperatura superficial constante igual a la temperatura del suelo en reposo T_g , la solución de fuente lineal infinita está definida por:

$$T(r, z, t) = T_g + \frac{q}{4\pi k} \int_D^{D+H} \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh \quad (2.33)$$

donde erfc es la función de error complementaria. Para una condición de frontera adiabática en la superficie del suelo, la ecuación 2.29 tiene que modificarse ligeramente y el signo menos entre los dos términos complementarios de la función de error se reemplaza por un signo más. 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 desde la línea hundida en el tiempo t , se obtiene con la siguiente ecuación.

$$T(r, t) = T_g + \frac{\frac{q}{4\pi k^*} \int_{D_2}^{D_2+H_2} \int_D^{D+H} \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} + \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh dz}{H_2} \quad (2.34)$$

Con la ecuación 2.30 es posible evaluar la influencia térmica de un segmento de pila sobre otro.

2.8.4 Método del manual ASHRAE (Phil)

Los métodos de dimensionamiento de pozos se basan en los principios de superposición temporal y espacial. La superposición espacial se utiliza para determinar las funciones G o para evaluar las llamadas penalizaciones de temperatura causadas por la interacción térmica del pozo. Se requiere la superposición temporal para tener en cuenta los cambios en las cargas del suelo durante la duración esperada del sistema. En el método de dimensionamiento ASHRAE, la longitud de pila requerida se basa en tres tasas de transferencia de calor sucesivas con diferentes períodos de tiempo. Esto se ilustra con las tasas de transferencia de calor consecutivas: Q_1 desde $t=0$ a t_1 , Q_2 desde t_1 a t_2 y Q_3 desde t_2 a t_3 . Utilizando los conceptos de superposición temporal, la temperatura del pozo, T_b se determina como:

$$T_b - T_g = \frac{Q_1\Gamma(t_3 - 0) + (Q_2 - Q_1)\Gamma(t_3 - t_1) + (Q_3 - Q_1)\Gamma(t_3 - t_2)}{H} \quad (2.35)$$

donde Γ es el factor de respuesta térmica. Sustituyendo este valor, la ecuación 2.20 se reescribe como:

$$T_b - T_g = \frac{Q_1(\Gamma(t_3) - \Gamma(t_3 - t_1)) + Q_2(\Gamma(t_3 - t_1) - \Gamma(t_3 - t_2)) + Q_3(\Gamma(t_3 - t_2))}{H} \quad (2.36)$$

Suponiendo una condición de estado estable entre el fluido y la pared del pozo en $t = t_3$, la temperatura se calcula como:

$$T_f - T_b = \frac{(Q_3 R_b^*)}{H} \quad (2.37)$$

donde R_b^* es la resistencia efectiva del pozo. Sustituyendo la ecuación 2.21 en la ecuación 2.22 se tiene que:

$$H = \frac{Q_1(\Gamma(t_3) - \Gamma(t_3 - t_1)) + Q_2(\Gamma(t_3 - t_1) - \Gamma(t_3 - t_2)) + Q_3(\Gamma(t_3 - t_2) + R_b^*)}{T_f - T_g} \quad (2.38)$$

La ecuación 2.20 aplica para pilas individuales. Sin embargo, también se puede utilizar para conjuntos de pilas teniendo en cuenta la interferencia térmica de una sobre otra mediante el uso de funciones G o una penalización de temperatura.

2.8.4.1 Determinación de la resistencia térmica de la pila

En el cálculo de la resistencia térmica del concreto en la pila de energía se considera la resistencia de la tubería (R_p) y la resistencia de la lechada en el pozo (R_{gt}):

$$R_b = R_p + R_{gt} \quad (2.39)$$

La resistencia de conducción de la superficie interior de la tubería influye en su resistencia térmica. Para tuberías con configuración en U simple (dos tuberías), la resistencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{R_{filme} + R_{tube}}{2} = \frac{\left(\frac{1}{(\pi d_i h_{conv})} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_t}\right)}{2\pi k_p} \right)}{2} \quad (2.40)$$

Para tuberías con configuración en U doble (cuatro tuberías), la resistencia se determina como:

$$R_p = \frac{R_{filme} + R_{tube}}{4} = \frac{\left(\frac{1}{(\pi d_i h_{conv})} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_t}\right)}{2\pi k_p} \right)}{4} \quad (2.41)$$

El factor de correlación de resistencia térmica está definido por la siguiente expresión:

$$R_{grt} = \left[\beta_0 \left(\frac{d_b}{d_o} \right)^{\beta_1} \times k_{grt} \right]^{-1} \quad (2.42)$$

2.8.4.2 Diseño térmico de la pila de energía y resistencia térmica del suelo

Carlsaw *et al.* (1947) propusieron un método que requiere que el tiempo de operación, el diámetro exterior de la tubería y la difusividad térmica del suelo estén relacionados con un número de Fourier F_o (Kavanaugh *et al.*, 2014). Los valores de Fourier se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$F_{o_f} = \frac{4\alpha\tau_f}{d^2} \quad (2.43)$$

$$F_{o_1} = \frac{4\alpha(\tau_f - \tau_1)}{d^2} \quad (2.44)$$

$$F_{o_2} = \frac{4\alpha(\tau_f - \tau_2)}{d^2} \quad (2.45)$$

donde α es la difusividad térmica del suelo (m^2d^{-1}), d es el diámetro de la pila y τ_f , τ_1 y τ_2 se asocian a la duración en días de los pulsos corto, mensual y a largo plazo. El pulso corto tiene una duración de cuatro horas (0.167 días), el mensual tiene 30 días y a largo plazo se consideran 10 años (3650 días) aproximadamente. Por lo que su valor queda definido por:

$$\tau_1 = 3650 \quad (2.46)$$

$$\tau_2 = 3650 + 30 = 3680 \quad (2.47)$$

$$\tau_f = 3650 + 30 + 0.167 = 3680.167 \quad (2.48)$$

La ASHRAE propone un valor de F_s de 1.04 para tuberías con configuración de U simple y un cambio de temperatura a largo plazo en el suelo (t_p) entre $\pm 0.5^\circ\text{C}$ y $\pm 0.3^\circ\text{C}$ para periodos de 10 o 20 años. Los valores de resistencia térmica efectiva (R_{ga} , R_{gm} , R_{gst}) se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{k_g} \quad (2.49)$$

$$R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{k_g} \quad (2.50)$$

$$R_{gst} = \frac{G_2}{k_g} \quad (2.51)$$

donde k_g es la conductividad térmica del suelo ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), G_1 , G_2 y G_f son factores-G asociados a los valores de Fourier, F_{01} , F_{02} y F_{0f} , respectivamente. (Ingersoll *et al.*, 1954).

2.8.4.3 Determinación de la longitud de las pilas de energía requerida

La transferencia de calor en pilas de energía puede estimarse a partir de la ecuación propuesta por Ingersoll *et al.* (1954):

$$q = \frac{L_{bore}(t_g - t_w)}{R_{ov}} \quad (2.52)$$

donde q es la tasa de transferencia de calor entre la pila y el suelo, L_{bore} es longitud de la pila, t_g es la temperatura del suelo, t_w es la temperatura media del agua del circuito y R_{ov}

es la resistencia térmica total del suelo y pila. Los valores de q_{evap} y q_{cond} se calculan como:

$$\frac{q_{evap}}{q_{lh}} = \frac{COP_h - 1}{COP_h} \quad (2.53)$$

$$q_{evap} = q_{lh} * \frac{COP_h - 1}{COP_h} \quad (2.54)$$

donde q_{evap} es la tasa de calor del evaporador de la bomba de calor, q_{lh} es la carga de diseño para calentamiento, COP_h es el coeficiente de desempeño en modo calefacción ($W_{calor}/W_{eléctrico}$).

La transferencia de calor neta anual (q_a) se obtiene considerando las horas equivalentes en plena carga de refrigeración ($EFLH_c$) y calefacción ($EFLH_h$):

$$q_a = \frac{q_{cond} \times EFLH_c + q_{evap} \times EFLH_h}{8760} \quad (2.55)$$

En función de lo anterior, la longitud de la pila puede obtenerse como:

$$L_{bore} = \frac{q \times R_{ov}}{(t_g - t_w)} \quad (2.56)$$

La tasa de calor q está relacionada con los requerimientos térmicos de la edificación. La temperatura del suelo t_g , determina la resistencia térmica general y está limitada por las propiedades térmicas del suelo, el diseño de la pila y la tasa de intercambio de calor. La resistencia térmica del suelo por unidad de longitud (R) se calcula en función del tiempo en que se produce un pulso de calor particular. Las ecuaciones 2.40 y 2.41 incluyen mínimo tres pulsos de calor: anual promedio, mensual promedio (anterior al día del diseño) y a corto plazo (pulso máximo de una a seis horas de duración):

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + q_{cond} (R_b + PLF_m R_{gm} + F_{sc} R_{gst})}{t_g - \frac{ELT + LLT}{2} + t_p} \quad (2.57)$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + q_{evap} (R_b + PLF_m R_{gm} + F_{sc} R_{gst})}{t_g - \frac{ELT + LLT}{2} + t_p} \quad (2.58)$$

donde L_c es la longitud de las pilas requerida para enfriamiento (m), L_h es la longitud de las pilas requerida para calentamiento (m), q_a es el promedio anual neto de transferencia de calor al subsuelo (W), R_{ga} es la resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor a largo plazo (mK W^{-1}), q_{evap} es la tasa de calor extraída del suelo (W), q_{cond} es la tasa de calor inyectada al suelo (W) R_b es la resistencia térmica de la pila (mK W^{-1}), R_{gm} es la resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor mensual (mK W^{-1}), R_{gst} es la resistencia térmica efectiva del suelo a un pulso de calor corto (mK W^{-1}), PLF_m es el factor de carga parcial para el mes de diseño, F_{sc} es el factor de pérdida de calor entre las tuberías de ingreso y salida de la pila, t_g es la temperatura no alterada o inicial del suelo ($^{\circ}\text{C}$), t_p es el cambio de temperatura a largo plazo causado por el desequilibrio en la transferencia de calor ($^{\circ}\text{C}$), ELT es la temperatura de entrada del líquido a la bomba de calor ($^{\circ}\text{C}$), LLT es la temperatura de salida del líquido a la bomba de calor ($^{\circ}\text{C}$).

2.8.4.4 Mejoras del método de dimensionamiento del manual ASHRAE

La metodología propuesta por la ASHRAE consiste en la estimar la longitud total de las pilas de energía requerida para satisfacer las cargas térmicas de una edificación. La ecuación 2.54 se utiliza para calcular la longitud de pilas de energía referida durante la fase de calentamiento (L_t):

$$L_t = \frac{q_e R_b + q_y R_{g10y} + q_m R_{1m} + q_e F_{Sc} R_{g4h}}{T_0 - \frac{ELT + LLT}{2} + T_p} \quad (2.59)$$

donde q_e es la carga térmica pico horaria transmitida al suelo, q_y es la carga térmica promedio anual transmitida al suelo, q_m es la carga térmica promedio mensual transmitida al suelo para el mes de diseño, F_{Sc} es un factor de pérdida de calor, R_b es la resistencia térmica de la pila (mKW^{-1}), T_0 es la temperatura inicial del suelo ($^{\circ}\text{C}$), ELT es la temperatura de entrada del agua a la bomba de calor ($^{\circ}\text{C}$), LLT es la temperatura de salida del agua de la bomba de calor ($^{\circ}\text{C}$), T_p es una penalización térmica, y R_{g10y} , R_{g1m} y R_{g4h} son las resistencias térmicas del suelo para pulsos térmicos de 10 años, 1 mes y 4 horas (mKW^{-1}), respectivamente.

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

$$q_g = q \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (2.60)$$

El coeficiente de desempeño COP cuantifica la eficiencia energética de las bombas de calor. El COP se define como la relación entre la energía obtenida y la energía eléctrica suministrada a la bomba. Los valores típicos varían entre 3.0 y 6.0 (Lund *et al.*, 2004).

Las resistencias térmicas del suelo se determinan como se muestra a continuación:

$$R_{g4h} = \frac{1}{\lambda} G\left(\frac{\alpha t_{4h}}{r^2}\right) \quad (2.61)$$

$$R_{g1m} = \frac{1}{\lambda} \left[G\left(\frac{\alpha t_{1m+4h}}{r^2}\right) - G\left(\frac{\alpha t_{4h}}{r^2}\right) \right] \quad (2.62)$$

$$R_{g10y} = \frac{1}{\lambda} \left[G\left(\frac{\alpha t_{10y+1m+4h}}{r^2}\right) - G\left(\frac{\alpha t_{4h}}{r^2}\right) \right] \quad (2.63)$$

donde λ es la conductividad térmica del suelo ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), α es la difusividad térmica del suelo, r es el radio de la pila de energía, t_{4h} , t_{1m+4h} y $t_{10y+1m+4h}$ representan la duración de un pulso. Los subíndices y , m , y h se refieren a los años, meses y horas, respectivamente. En las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25, G es una función que representa una fuente de calor cilíndrica infinita:

$$G = \frac{1}{\pi r} \int_{-\infty}^{\infty} (e^{-\alpha u^2 t} - 1) \frac{J_0(ur)Y_1(ur) - Y_0(ur)J_1(ur)}{u^2 [J_1^2(ur) + Y_1^2(ur)]} du \quad (2.64)$$

donde J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de primera especie de orden 0 y 1 y Y_0 y Y_1 las funciones de Bessel de segunda especie de orden 0 y 1, respectivamente. La resistencia térmica de la pila R_b se estimó con el método propuesto por Claesson y Javed (2020):

$$R_b = R_p + R_c \quad (2.65)$$

donde R_p es la resistencia de las tuberías (incluyendo el fluido) y R_c es la resistencia de la parte del concreto de la pila. El valor de R_p puede estimarse como:

$$R_p = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} + \frac{\ln(r_0/r_i)}{2n\pi\lambda_\pi} \quad (2.66)$$

donde r_i es el radio interior de la tubería, r_0 es el radio exterior de la tubería, λ_π la conductividad térmica de la tubería, n el número de tuberías dentro de la pila y h_i el

coeficiente de transferencia de calor que se determina mediante la correlación de Gnieliski (1976). Por otra parte, R_c se determina con la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{1}{2\pi n \lambda_b} \left[\ln \left(\frac{r^n}{nr_0 r_c^{n-1}} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r^{2n}}{r^{2n} - r_c^{2n}} \right) \right] \quad (2.67)$$

donde λ_b es la conductividad térmica del concreto, r_c es la distancia radial del centro de la pila a las tuberías y σ es:

$$\sigma = \frac{\lambda_b - \lambda}{\lambda_b + \lambda} \quad (2.68)$$

La principal ventaja del método de dimensionamiento del manual ASHRAE es que los cálculos son relativamente simples ya que los valores de R_{ga} , R_{gm} y R_{gd} son independientes de la longitud de la pila. Para pilas simples $T_p=0$, la longitud de la pila (L) se obtiene directamente con las ecuaciones 2.62 y 2.63. Para conjuntos de pilas se puede estimar el valor de T_p a partir de tabuladores en el manual y de esta manera encontrar el valor de L sin necesidad de realizar iteraciones. Es posible evitar el uso de T_p usando funciones G como factores de respuesta térmica en las ecuaciones 2.64, 2.65 y 2.66. Con este enfoque, las tres resistencias térmicas efectivas del suelo se calculan como:

$$R_{ga,g} = \frac{g(t_3 - t_0) - g(t_3 - t_1)}{2\pi k^*} \quad (2.69)$$

$$R_{gm,g} = \frac{g(t_3 - t_1) - g(t_3 - t_2)}{2\pi k^*} \quad (2.70)$$

$$R_{gd,g} = \frac{g(t_3 - t_2)}{2\pi k^*} \quad (2.71)$$

donde $g(t_i-t_j)$ es la función g evaluada para un periodo de tiempo correspondiente a (t_i-t_j) donde $t_0=0$. El índice g se ha agregado a $R_{ga,g}$, $R_{gm,g}$, $R_{gd,g}$ para indicar que se basan en funciones G. Con la solución de cilindro infinito, las ecuaciones de dimensionamiento de ASHRAE basada en las funciones G pueden reescribirse como:

$$L_c = \frac{q_a R_{ga,g} + q_{m,c} R_{gm,g} + q_{h,c} R_{gd,g} + q_{h,c} R_b^*}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2}} \quad (2.72)$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga,g} + q_{m,h} R_{gm,g} + q_{h,h} R_{gd,g} + q_{h,h} R_b^*}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2}} \quad (2.73)$$

Las ecuaciones 2.26 y 2.27 forman la base del método de dimensionamiento alternativo presentado en el manual ASHRAE (2015). Las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 se deben resolver de manera iterativa como $R_{ga,g}$, $R_{gm,g}$, $R_{gd,g}$, dependiendo de la longitud del pozo que se desconoce a priori.

2.9. Análisis costo-beneficio de las pilas de energía

Las pilas de energía permiten reducir los costos de perforación asociados a los sistemas tradicionales (pozos), ya que las tuberías se instalan dentro de la cimentación. Así, los costos adicionales corresponden a los materiales de las tuberías, la mano de obra y los posibles retrasos en el programa de construcción.

Existen algunos indicadores económicos para evaluar los beneficios de la implementación de pilas de energía, y de esta forma justificar los costos adicionales frente a los sistemas de climatización convencionales. Los indicadores económicos como el período de recuperación simple y el valor actual se utilizan ampliamente para analizar la factibilidad financiera de los proyectos de ingeniería. No obstante, estos parámetros tienen algunas desventajas que pueden afectar la toma de decisiones (Lu *et al.*, 2019).

El valor presente (*VP*) indica la magnitud equivalente de todos los flujos de efectivo en relación con el punto de partida. Cuando $VP > 0$, el proyecto es factible. La principal desventaja es que, se supone que el flujo de efectivo futuro se reinvierte a una tasa de *TREMA* (Tasa de Retorno Mínima Atractiva). El *VP* puede obtenerse como:

$$VP(i\%) = F_0(1+i)^0 + F_1(1+i)^{-1} + \dots + F_N(1+i)^{-N} = \sum_{k=0}^N F_k(1+i)^{-k} \quad (2.74)$$

donde i es la tasa de interés efectiva, k es el índice para cada período de estudio, F_k es el flujo de caja futuro al final del periodo, N es el número de periodos de estudio.

El valor anual (*VA*) es el ahorro equivalente obtenido durante un año menos el monto de recuperación de capital equivalente anual. Cuando $VA > 0$, el proyecto es factible. Al igual que en el *VP*, se asume que el flujo de efectivo futuro se reinvierte a una tasa de *TREMA*. Por otra parte, el periodo de recuperación simple (*PRS*) representa la cantidad de años necesarios para que las entradas de efectivo sean iguales a las salidas de efectivo. Las desventajas de este indicador son que, no considera el valor del dinero en el tiempo y no indica la conveniencia del proyecto. Por lo que los resultados pueden ser erróneos. Las

ecuaciones para determinar el VA y el PRS quedan definidas por las ecuaciones 2.70 y 2.71:

$$VA(i\%) = R - E - CR(i\%) = \sum_{k=0}^N F_k (1 + i)^{-k} \quad (2.75)$$

$$PRS = \sum_{k=1}^{\theta} (R_k - E_k) - I \geq 0 \quad (2.76)$$

donde i es la tasa de interés efectiva, k es el índice para cada período de estudio, F_k es el flujo de caja futuro al final del periodo, N es el número de periodos de estudio, R es el ahorro anual equivalente de un proyecto, E es el gasto anual equivalente, I es la inversión inicial y CR es la cantidad anual equivalente de recuperación de capital.

Luo *et al.* (2016) realizaron un análisis económico donde emplearon un factor costo-beneficio que desprecia los costos típicos de construcción de pilas convencionales (perforación, materiales, entre otros). El costo de los intercambiadores de calor se obtiene multiplicando el total de la longitud de la tubería por su precio unitario, como se muestra a continuación:

$$C = \frac{(L)(P_p)}{H} \quad (2.77)$$

donde C es el costo del intercambiador de calor por metro de longitud de tubería embebida en las pilas de energía ($\$ m^{-1}$), L es el total de la longitud de las tuberías (m), P_p es el precio por un metro de tubería ($\$$), H es la longitud total de las pilas de energía (m).

Los beneficios son evaluados con base en tasas específicas de intercambio térmico obtenidas a partir de pruebas de desempeño durante las etapas de calentamiento y enfriamiento. Para el análisis se consideraron los promedios de un año de operación del sistema. Así, el beneficio puede calcularse como:

$$E = (q_h t_h q_c t_c) P_e \quad (2.78)$$

donde E son los beneficios operativos ($\$ m^{-1}$), q_h es la tasa de intercambio térmico en la fase de calentamiento ($kw m^{-1}$), t_h es la duración promedio de operación del sistema en fase de calentamiento, q_c es la tasa de intercambio térmico en la fase de enfriamiento, en ($kw m^{-1}$), t_c es la duración promedio de operación del sistema en la fase de enfriamiento y P_e es el precio de la electricidad ($\$ kW^{-1} h^{-1}$). Para comprender la relación costo-

beneficio, Lou *et al.* propusieron un índice que compara dichos conceptos. El valor que define la relación ahorro/inversión IAI , se obtiene dividiendo los beneficios anuales entre los costos de capital:

$$IAI = \frac{B}{C} \quad (2.79)$$

donde IAI es el índice ahorro-inversión, B son los beneficios ($\$ m^{-1}$) y C es el costo de la tubería ($\$ m^{-1}$). El costo de inversión inicial de una pila de energía con tubería helicoidal es mayor que el de un elemento con tubería tipo U (Yoon *et al.*, 2022). Sin embargo, al considerar proyectos de inversión (especialmente proyectos a largo plazo) se deben calcular y comparar otros indicadores económicos como: el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación (PDR). El VPN se refiere al valor del flujo de efectivo futuro convertido al presente a una tasa de interés dada. El VPN y la TIR se determinan empleando las siguientes ecuaciones:

$$VPN = \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+k)^t} - C_0 \quad (2.80)$$

$$\sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+TIR)^t} - C_0 = 0 \quad (2.81)$$

La TIR es un indicador económico importante al invertir en un proyecto y se define como la tasa de interés en la cual el VPN es cero (ecuación 2.61). En la selección los proyectos, se priorizan aquellos con una TIR mayor. El PDR es el tiempo requerido para devolver la inversión inicial del proyecto. Se calcula dividiendo el costo total de la inversión inicial por la entrada de efectivo neta anual. En general, se eligen los proyectos con un PBP menor.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PILAS DE ENERGÍA

El diseño térmico de las pilas de energía implica la estimación de la cantidad de energía que el sistema puede intercambiar con el suelo circundante para satisfacer total o parcialmente las cargas térmicas de la edificación (López-Acosta *et al.*, 2022). Si la longitud de pilas instaladas es insuficiente, el sistema puede fallar durante el tiempo de operación de la estructura. En cambio, si se instala una cantidad de pilas superior a las requeridas, el sistema será ineficiente y costoso. Así, es necesario calcular la longitud óptima para cumplir con las temperaturas mínimas/máximas del fluido de entrada de la bomba de calor. Para ello, se debe considerar la variación en el tiempo de las cargas térmicas, ya que el suelo que rodea la pila se encuentra regido por condiciones a largo plazo. Por razones económicas y constructivas, la guía suiza (SIA-D0190, 2005) recomienda una longitud para pilas de energía entre 10-60 m.

3.1. Consideraciones en el análisis de intercambio de calor

3.1.1. Transporte de calor en el suelo

La transferencia de calor en el suelo se considera un proceso difusivo (es decir, dominado por la conducción). Por lo que las soluciones analíticas disponibles suponen que este es el único mecanismo para el flujo de calor. El flujo de agua subterránea puede influir en la transferencia de calor por advección adicional. Sin embargo, en el caso del almacenamiento de energía térmica el flujo debe ser abundante para que este efecto sea significativo, ya que la advección simplemente cambia la posición del almacenamiento térmico subterráneo.

3.1.2. Transporte de calor dentro de una pila de energía

De forma similar, la transferencia de calor dentro de la pila de energía se describe como un proceso difusivo. Algunas soluciones resuelven las ecuaciones de difusión directamente, pero es más común utilizar en su lugar una resistencia térmica. Dicho valor se considera como la inversa de la conductividad térmica y toma en cuenta la influencia de la geometría de la pila. Si se supone que el intercambiador de calor supera el estado térmico estable, la resistencia térmica se calcula como una constante. Lo anterior representa una diferencia de temperatura constante entre la tubería y el borde del elemento. Así, se simplifican las ecuaciones de transferencia de calor. Sin embargo, entre mayor sea el área de la sección transversal del intercambiador de calor, menor será la validez de esta suposición. Esto se debe a que requiere un largo tiempo alcanzar el estado térmico estable.

3.1.3. Efectos en el transporte de calor por las condiciones en superficie

En general, la temperatura del suelo varía respecto a la temperatura del aire. Sin embargo, a partir de los 10 o 20 m de profundidad, la oscilación estacional del ambiente ya no afecta su comportamiento. Las pilas de energía normalmente se construyen total o parcialmente dentro de esta zona. Por lo tanto, las fluctuaciones de temperatura deben tomarse en cuenta si existe una estructura directamente sobre las pilas (edificaciones) o si la superficie se encuentra expuesta al aire (estructuras de retención).

Algunas soluciones analíticas suponen que el intercambio de calor tiene una longitud finita. No obstante, los efectos axiales son importantes en pilas de energía cortas y es necesario considerar los efectos finales, especialmente a largo plazo.

3.1.4. Interacciones térmicas

Existen métodos de análisis que se aplican específicamente para pilas de energía aisladas. Sin embargo, las pilas trabajan en grupos, por lo que es necesario utilizar la superposición para calcular la interacción entre ellas. La interferencia térmica también puede ocurrir entre las tuberías individuales dentro de un intercambiador de calor. Así, dependiendo de la geometría de la geoestructura, la tasa de flujo y las tuberías instaladas, es necesario considerar estos efectos para evitar daños en el sistema.

3.1.5. Cargas térmicas

Las cargas térmicas aplicadas son variables durante la operación de los sistemas intercambiadores de calor. Si cada cambio de temperatura se toma en cuenta para la estimación de las escalas de tiempo, sus valores aumentan hasta niveles incalculables. Por lo tanto, se realizan con algún método de adición de carga.

Cada una de las consideraciones discutidas anteriormente requiere diferentes escalas de tiempo. Para los modelos de transferencia de calor en suelos es necesario realizar el cálculo a gran escala (metros). En cambio, la transferencia de calor entre las pilas, el suelo y el sistema de tuberías, se simula con una escala más pequeña (centímetros).

3.2. Métodos analíticos para el análisis térmico de pilas de energía

En el capítulo 2 se describen algunos métodos de análisis térmicos y termo-mecánicos para la implementación de pilas de energía. Sin embargo, existe una falta de orientación respecto a la aplicación de dichos análisis, las consideraciones de diseño (cargas adicionales y asentamientos diferenciales) y la evaluación de resultados. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de flujo con las soluciones analíticas para el diseño térmico de pilas de energía en condiciones de calor puro y no puro (Loveridge *et al.*, 2013). Además, se definen los diferentes modelos existentes para cada caso particular.

3.3. Recomendaciones para el procedimiento constructivo de una pila de energía

3.3.1. Tuberías intercambiadoras de calor

3.3.1.1 Materiales

La tubería colocada para el sistema primario, es decir, la que va colocada dentro de la pila de energía, puede ser de polietileno de alta densidad o polietileno reticulado y deben cumplir con las siguientes características (IGSHPA 2017; López-Acosta *et al.*, 2020). Para tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD):

- Todas las tuberías y materiales de termofusión deben ser manufacturados a partir de resina virgen. El diámetro exterior y el diámetro interior, el espesor de pared y sus respectivas tolerancias deben cumplir lo especificado en las normas ASTM D3261 para accesorios de fusión a tope, ASTM D2683 para accesorios de fusión a socket y ASTM F1055 para accesorios de electrofusión.
- El polietileno de alta densidad (PEAD) debe ser tipo PE3408/3608 o PE4710, con clasificación de celda mínimo PE345464 según la norma ASTM D3350 y una base de diseño hidrostático de 11.03 MPa (1600 psi) a 23°C (73.4°F) de acuerdo con la norma ASTM D2837.
- Las tuberías con diámetros nominales menores o iguales a 2 pulgadas (6.033 cm) deben tener una relación dimensional estándar (standard dimension ratio, SDR) mínima de 11, mientras que las tuberías con diámetros nominales mayores o iguales a 3 pulgadas (7.62 mm) deben tener una SDR mínima de 17.

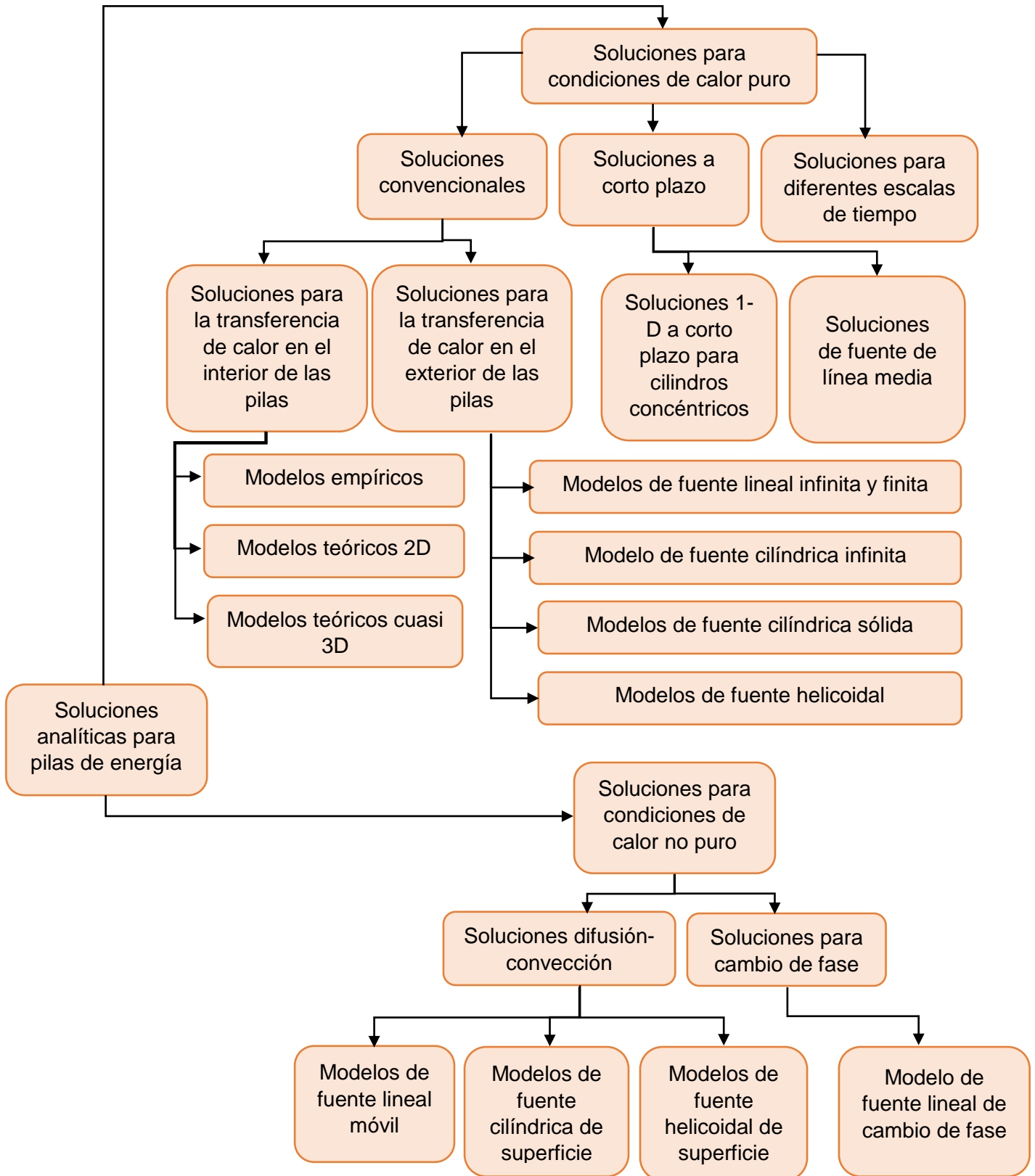


Figura 3.1. Diagrama de flujo de soluciones analíticas para pilas de energía (adaptado de Loveridge *et al.*, 2013)

Para tuberías de polietileno reticulado (PEX):

- Las tuberías de polietileno reticulado (PEX) deben cumplir los requerimientos de las normas ASTM F876 y F877. Se permite únicamente el uso de accesorios poliméricos electrosoldables (polymer electro-fusion fittings) de acuerdo con la norma ASTM F1055 o de accesorios de expansión en frío con conexiones de casquillos de compresión de metal (cold expansion compression-sleeve metal fittings) de acuerdo con la norma ASTM F2080. Todos los accesorios deben tener un diámetro interno mínimo de 82% del diámetro interno de la tubería.
- El polietileno reticulado (PEX) debe ser de alta densidad PEX 1006 o PEX 1008 fabricado utilizando el método de peróxido de alta presión con un grado de reticulación mínimo del 75%.
- Las dimensiones de las tuberías deben cumplir las especificaciones definidas en las normas ASTM F876 y F877 con una presión nominal de 1.103 MPa (160 psi) a 23°C (73.4°F).

3.3.1.2. Métodos de unión de tuberías

Los métodos aceptables para la unión de tuberías enterradas son el proceso de termofusión y sistemas tipo stab (stab-type fittings). Estos últimos deben proveer una unión hermética más fuerte que la tubería (López-Acosta *et al.*, 2020). Las tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD) pueden unirse por medio de fusión a tope, de socket, lateral o electrofusión de acuerdo con las especificaciones del fabricante. No se permite la conexión directa de accesorios tipo espiga con abrazaderas mecánicas (barbed fittings utilizing mechanical clamps) con las tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD), a excepción de los sistemas tipo stab (stab-type fittings). Toda conexión mecánica debe estar accesible (IGSHPA 2017; López-Acosta *et al.*, 2020). Las tuberías de polietileno reticulado (PEX) no deben soldarse a los accesorios por medio de fusión a tope o de socket (IGSHPA 2017; López-Acosta *et al.*, 2020).

3.3.2. Fijación y posicionamiento de las tuberías

Las tuberías embebidas en el concreto deben ser fijadas empleando un sistema rígido temporal o definitivo, los cuales pueden ser perfiles, tuberías o el armado mismo de la pila; siempre y cuando permita el posicionamiento especificado en el diseño. Este sistema puede complementar el refuerzo especificado en el proyecto estructural y debe extenderse hasta el nivel superior de la estructura (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

La separación mínima recomendada entre tuberías es de 15 cm. Por lo que el número máximo de tuberías está en función del diámetro de la pila. En la tabla 3.1 se especifica el número de tuberías según el tamaño de la pila (CFMS-SYNTEC--SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

Tabla 3.1. Número máximo de bucles en función del diámetro de la pila (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

Diámetro de la pila	Número de bucles
< 40 cm	1
40 a 60 cm	2
60 a 80 cm	3
80 a 100 cm	4
> 100 cm	4+1 bucle adicional por cada incremento de 20 cm

No se recomienda el uso de tuberías de auscultación para pilas con diámetros menos a 60 cm para evitar posibles obstrucciones durante el colado. Los radios de curvatura de las tuberías se construyen según los requisitos del fabricante de la tubería. En caso de que esto no sea posible, se deben colocar los codos en U termo-soldables al final de los bucles. En ausencia de información, se supone un radio de curvatura $r_c=20*D$, donde D es el diámetro exterior de la tubería.

3.3.2.1. Disposiciones relativas de las tuberías

Se recomienda respetar una distancia mínima de $4D_{máx}$ entre los refuerzos longitudinales y las tuberías cuando el elemento empleado como sistema de posicionamiento rígido tenga una función estructural, siendo $D_{máx}$ el tamaño máximo del agregado del concreto. Las tuberías deben fijarse al refuerzo transversal de la pila. La Figura 3.2 muestra la separación de la tubería recomendada respecto al acero longitudinal.

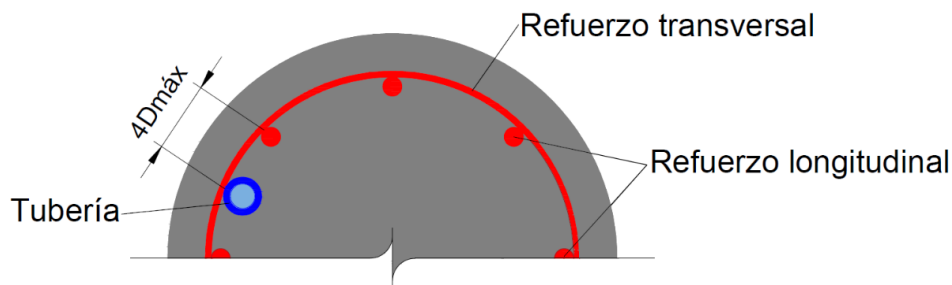


Figura 3.2. Separación mínima entre tuberías y refuerzo longitudinal

3.3.2.2. Fijación de las tuberías

Las tuberías deben sujetarse en forma transversal con la finalidad de evitar deformaciones excesivas. Los espaciamientos máximos para los amarres metálicos son de un metro, mientras que para amarres de plástico son de tan solo 50 cm. Es importante destacar que, en el primer y último metro del bucle, la tubería debe sujetarse a cada 25 cm. La Figura 3.3 muestra la separación mínima del bucle de la tubería con el fondo de la pila.

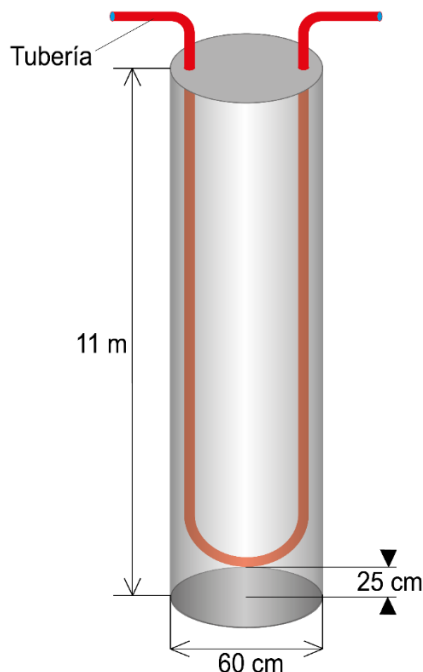


Figura 3.3. Separación mínima del final del bucle

Se recomienda una separación mínima de 25 cm entre la base del refuerzo y la parte inferior del bucle. En el caso de pilas con configuraciones de dos o más bucles se recomienda una distancia mínima de 20 cm entre el inicio del refuerzo y los bucles ubicados en la cabeza de la pila (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

3.3.3. Pruebas de purgado, presión y flujo

Previo a la instalación, es necesario verificar que no existan fugas en las juntas ni en las tuberías. Se debe purgar cada circuito de suministro haciendo circular agua en ambas direcciones a una velocidad mínima de 0.61 m/s (2 pie/s). El flujo deberá mantenerse por un mínimo de 15 minutos en cada dirección con el objetivo de remover todos los escombros y aire de las tuberías.

Las pruebas de presión deben efectuarse de acuerdo con la norma ASTM F2164. La presión máxima de prueba es 1.5 veces la presión estática de diseño menos la carga hidrostática de elevación. Cuando no se conozca la presión estática de diseño, se debe utilizar una presión de 690 kPa (100 psi). En ningún momento la presión máxima de prueba debe exceder la presión nominal de los accesorios con menor presión nominal del sistema.

Es importante efectuar pruebas de presión en las tuberías embebidas para determinar la presencia de posibles fugas u obstrucciones en al menos las siguientes etapas de construcción (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

- Después del ensamblaje cada circuito, incluyendo las conexiones a la perforación y luego del colado de la estructura.
- Después de completar la instalación de todo el sistema de intercambio de calor y previo a su conexión con el sistema secundario.

La duración de las pruebas de presión no debe ser menor a una hora después de la estabilización de la presión. Una prueba se considera aceptable si no se observan fugas y la presión se mantiene constante durante las etapas de ensayo (dentro del 5% de la presión de ensayo). Luego de la conclusión de las pruebas de presión, cada circuito debe mantenerse lleno de agua a una presión mínima de 400 kPa (58 psi) hasta la conexión final con el circuito secundario (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

3.3.4. Procedimiento constructivo de la pila de energía

Para la construcción de la pila primero se realiza una perforación desde el terreno natural con el diámetro especificado en el apartado 3.3.2.2. Considerando el material del sitio de estudio, se emplea una broca helicoidal o un bote de perforación. El diámetro de estas herramientas debe ser igual al diámetro del fuste de la pila. Este último se utiliza para que las paredes de la perforación permanezcan estables. En caso contrario, se debe colocar un fluido estabilizador o un ademe metálico.

La perforación se realiza hasta la profundidad propuesta en el proyecto, en este caso es de 11 metros (Figura 3.4a). Según la exploración geotécnica, el material a esa profundidad corresponde a tobas conformadas por arena media a gruesa. Una vez que se llega a la profundidad de desplante, se realiza la limpieza del material suelo en el fondo de la excavación. Para ello se puede utilizar un bote desazolvador con un diámetro igual al de la perforación, que se introduce hasta que quede completamente limpio. Luego, se instala el acero de refuerzo previamente habilitado con la tubería intercambiadora de calor y la instrumentación (Figura 3.4b). Cabe señalar que, se deben utilizar separadores para asegurar la posición de la pila. Esto debe realizarse al concluir la perforación de forma que se evite tener caídos en la misma. Finalmente, se coloca el concreto con ayuda de un tubo “Tremie” para no contaminar ni segregar el concreto. Cuando se inicia el colado, el extremo del tubo debe estar a 0.5 m sobre el fondo de la perforación. El vaciado del concreto debe concluirse sin espaciamentos para evitar la aparición de juntas frías (Figura 3.4c). A continuación, se describe el procedimiento constructivo de las pilas de energía:

- I. Perforación del barreno hasta nivel de desplante.
- II. Habilitado del armado de la pila.
- III. Colocación de mangueras con termofusión.
- IV. Purgado de la tubería
- V. Prueba de presión en tuberías.

- VI. Colocación del armado habilitado previamente con la tubería intercambiadora de calor, así como con la instrumentación.
- VII. Colado de la pila hasta nivel de terreno natural empleando el uso de Tubo tipo "Tremie".

El procedimiento constructivo en las pilas de energía puede variar según sea el caso. Por ejemplo, existen proyectos donde la longitud del elemento complica la adaptación de las tuberías en el armado de la pila. Por lo tanto, es necesario colocarlas por fuera del refuerzo transversal, como en el caso de la pila construida en la zona costera del estado de Jalisco. Esto puede suponer una variación en el diseño térmico y una disminución en el recubrimiento mínimo requerido. Por lo que es importante tomar en cuenta este tipo de modificaciones en el proceso de instalación. En la Figura 3.5 se muestran fotografías del procedimiento constructivo de una pila de energía construida en la zona costera del estado de Jalisco (CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP, 2017; López Acosta *et al.*, 2020).

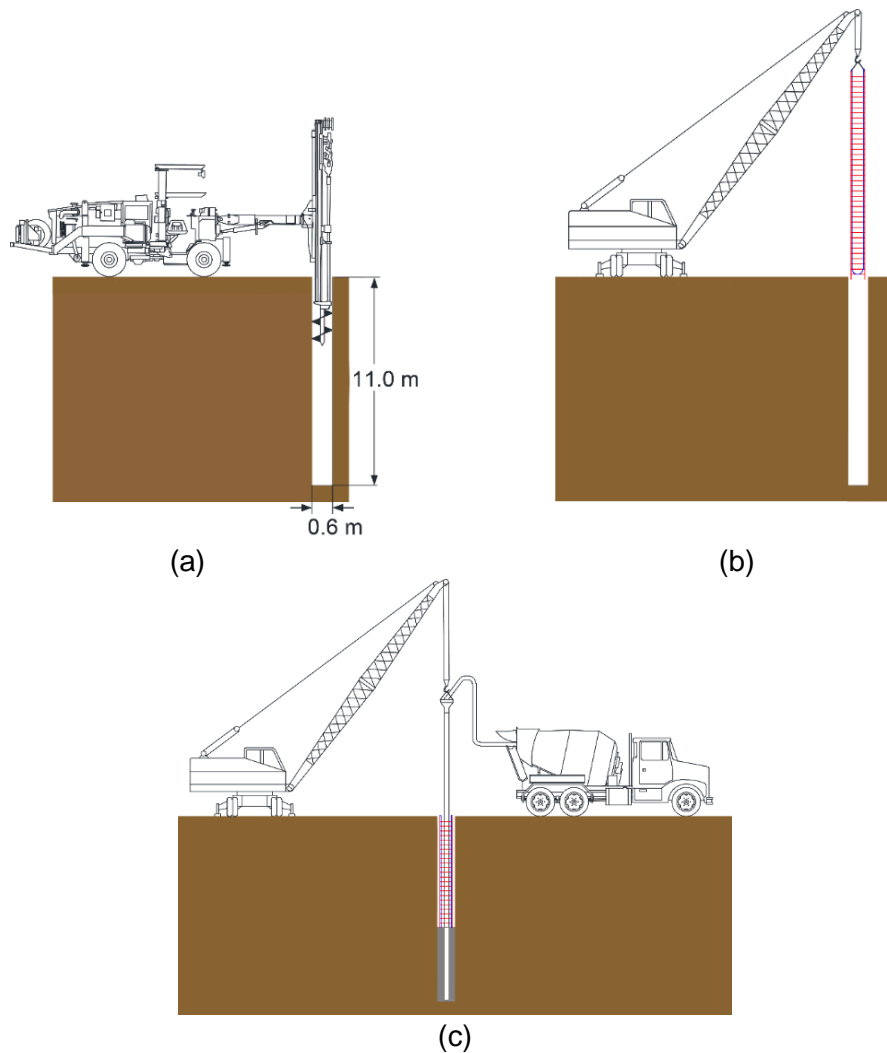


Figura 3.4. Procedimiento constructivo: (a) perforación del barreno, (b) colocación del armado y (c) colado de la pila



(a) Perforación de la pila de reacción



(b) Armado de la pila de reacción



(c) Uniones de mangueras por termofusión



(d) Purgado de la tubería



(e) Prueba de presión



(f) Fijación de los sensores PT-100



(g) Izaje del armado de la pila



(h) Colocación del armado



(i) Finalización de instalación de tubería



(j) Soldadura del armado



(k) Protección de instrumentación



(l) Colado de la pila

Figura 3.5. Fotografías del procedimiento constructivo de una pila de energía en el estado de Jalisco (López-Acosta *et al.*, 2022)

El habilitado del acero de refuerzo incluye la adaptación de la tubería de polietileno de alta densidad sujeto a este. La resistencia a compresión del concreto (f'_c) se propone de 250 kg/cm^2 y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (f_y) de 4200 kg/cm^2 . La sección

transversal de la pila se compone de ocho varillas longitudinales, con un arreglo equidistante y estribos del No. 2.5 a cada 30 cm (se consideran 6 cm de recubrimiento). En la Figura 3.6 se muestra un corte transversal de la disposición del armado en la pila y la adaptación de la tubería intercambiadora de calor. La Figura 3.7 presenta un corte longitudinal de la pila de energía donde se detallan los elementos que conforman el arreglo de la pila.

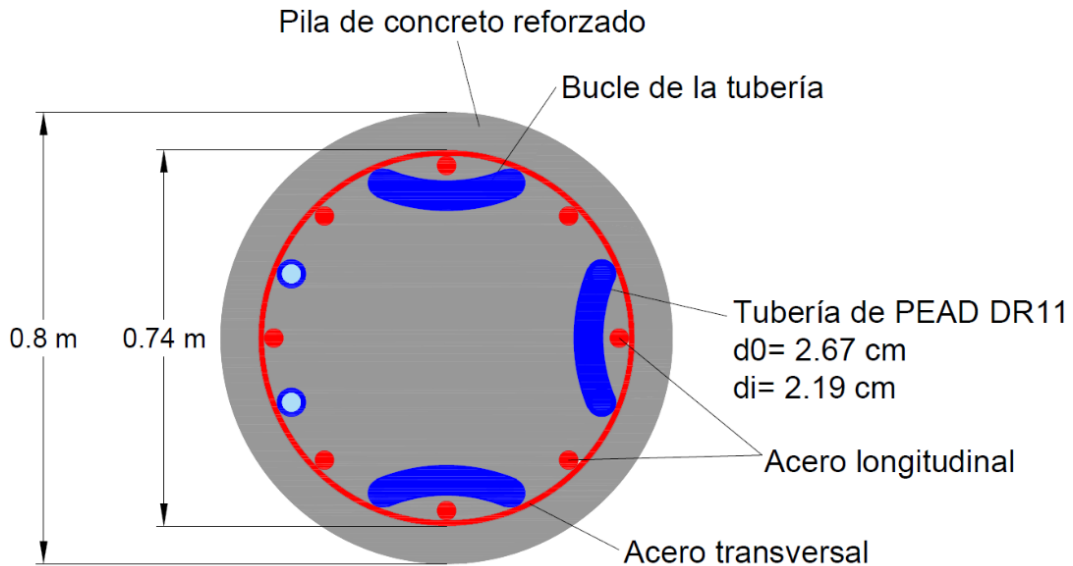


Figura 3.6. Detalle de la sección transversal de la pila de energía

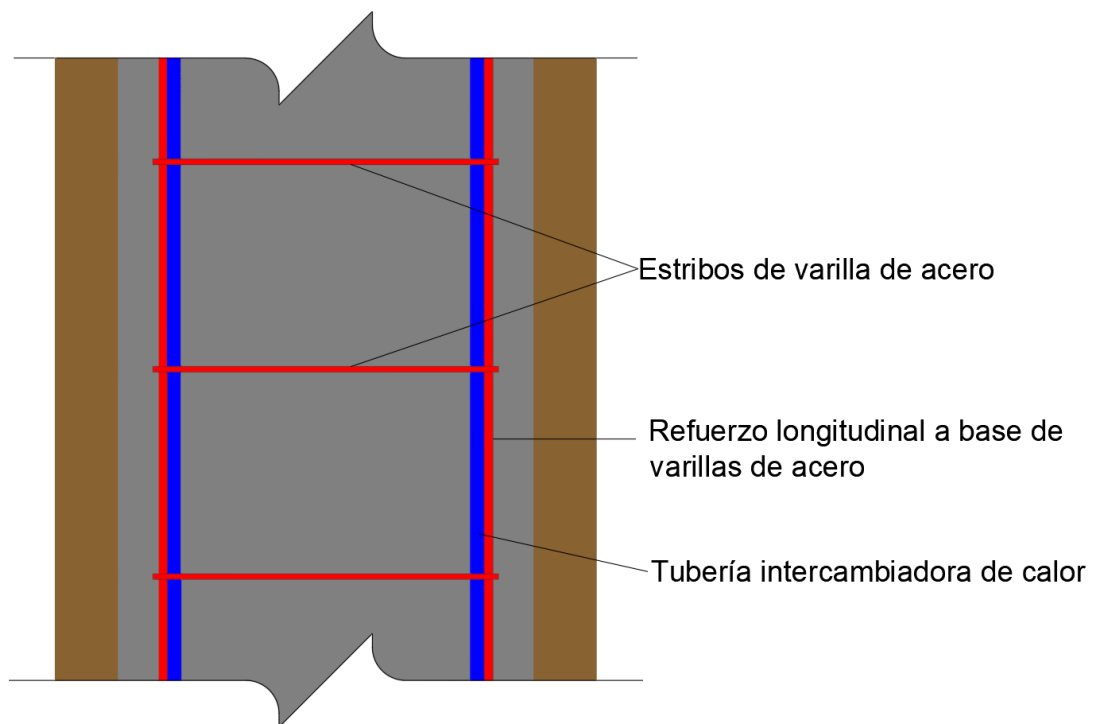


Figura 3.7. Detalle de la sección longitudinal de la pila de energía

3.3.5. Control de calidad en pilas de energía

El control de calidad en el diseño y construcción de sistemas intercambiadores de calor, especialmente en pilas de energía, es de gran importancia para garantizar las condiciones de servicio y durabilidad. Por lo tanto, es esencial revisar a detalle la red de tuberías para identificar las posibles fallas antes de realizar el colado de las pilas. De esta forma, los componentes pueden repararse o reemplazarse fácilmente. Una vez que se realiza el colado solo pueden identificar tuberías defectuosas que, en la mayoría de los casos, no se conectan a la bomba.

Los CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP (2017) proporcionan un procedimiento de control de calidad muy detallado para las diferentes fases de la construcción de geoestructuras energéticas, el cual se describe a continuación:

- I. Llegada de la tubería: Inspección visual.
- II. Después de la fijación al armado: Prueba de presión con una presión mínima de 4 bares. No se especifica información sobre el uso de aire o agua para la prueba de presión. Si la prueba falla, es necesario volver a instalar las tuberías. La presión se mantiene mientras se trasladan las tuberías al lugar de instalación (ver apartado 3.1.3).
- III. Instalación: Durante la instalación, se necesita una inspección visual continua para descartar raspones y deformaciones. Las tuberías deben estar bajo presión nominal durante esta etapa.
- IV. Después de la instalación: Es necesario realizar una prueba de presión después del colado, con la misma presión que se aplica durante la fijación al armado. Si se mide una caída de presión superior a 0.1 bar, se debe reparar la tubería. Si no es posible, el bucle debe anotarse como perdido y las conexiones horizontales deben adaptarse en consecuencia.
- V. Después del corte: Se realiza una prueba de presión que debe cumplir los mismos requisitos que la revisión efectuada después de la instalación, es decir, una caída de presión superior a 0,1 bar significa que se pierde el bucle.
- VI. Después de la red de tubos: Todas las tuberías están bajo presión y cualquier elemento que presente una caída de presión debe repararse si es posible o anotarse como perdido. Tanto la prueba de descarga como la de presión deben realizarse antes de entregar el sistema al cliente.

La Ground Source Heat Pump Association (2012) recomienda un conjunto de pruebas normalizadas que se pueden realizar en cualquier fase relevante de la construcción:

- I. Prueba de observación: Inspección visual de la tubería para asegurar su conformidad con el esquema de instalación e identificar posibles defectos. Esta prueba debe realizarse cuando los bucles estén listos en el sitio de construcción y durante la instalación del armado.

- II. Prueba de flujo bidireccional: El circuito está lleno de agua y debe asegurarse de que el agua pueda fluir en ambas direcciones del circuito. No se necesita pérdida visual de flujo para la aceptación de la prueba. Esta prueba debe realizarse antes del colado, así como antes y después del descabezado.
- III. Prueba de presión de agua tipo A: La presión del agua se eleva al 150% de la presión de trabajo de las tuberías. Los criterios de aceptación no permiten ninguna pérdida de presión durante esta prueba. Tiene que realizarse una vez ensamblados los bucles. Esta prueba generalmente se realiza fuera del sitio cuando los bucles se ensamblan antes de su entrega al sitio de construcción y también se puede realizar en el sitio si el ensamblaje se realiza en el sitio. En condiciones de fábrica, la presión del aire puede ser adecuada en lugar de la presión del agua.
- IV. Prueba de presión de agua tipo B: La presión del agua se mantiene a 8 bares durante 10 minutos (se agrega agua si es necesario). Luego se reduce la presión a 4 bares y se mantiene durante otros 30 minutos. La prueba se acepta si no se mide ninguna pérdida de presión en los últimos 30 minutos. Esta prueba debe realizarse antes del colado y antes del recorte. La presión de agua nominal debe permanecer en las tuberías después de la prueba cuando se realiza antes de hormigonar para evitar el aplastamiento de las tuberías.
- V. Prueba de presión de agua tipo C: Igual que la prueba tipo B excepto que después de 10 minutos a 8 bares, los bucles permanecen presurizados a 4 bares durante 24 horas en lugar de 30 minutos. Los criterios de aceptación no permiten pérdidas de carga durante 24 horas. Esta prueba debe realizarse inmediatamente después del colado, así como después del recorte (antes de realizar las conexiones con el cabezal). Cuando se realiza durante el colado, se espera un aumento de presión durante la hidratación del concreto.
- VI. Prueba de inmersión: Se emplea con el uso de una sonda para medir la profundidad de los bucles térmicos instalados y asegurarse que está de acuerdo con el esquema de planificación. Esta prueba debe realizarse después de descabezar las pilas y antes de agregar las conexiones con la bomba. Si bien la Ground Source Heat Pump Association (2012) establece que se utilizará agua para las pruebas de presión y no aire, CFMS-SYNTEC-SOFFONS-FNTP (2017) no propone las mismas consideraciones. En cualquier caso, el manejo general de las pruebas que no alcanzan los criterios de aceptación es el mismo: reemplazar los elementos defectuosos si es posible o anotar el bucle como perdido.

3.4. Sistema de aplicación de cargas

Una vez construida la pila de energía, se procede a realizar la prueba de carga estática en condiciones no isotérmicas. Para ejecutar el ensayo se emplea un sistema de reacción y aplicación de carga axial en compresión (Figura 3.8). Dicho sistema consiste en un

arreglo de dos vigas de acero apoyadas en pilas de reacción. La carga se aplica utilizando un gato hidráulico y una bomba manual.

Las pruebas de carga en condiciones no isotérmicas caracterizan la relación carga-desplazamiento en estructuras sujetas a cambios de temperatura, como las pilas de energía. Estas pruebas consisten en aplicar combinaciones de cargas térmicas y mecánicas al elemento y por medio de un sistema de instrumentación se mide la temperatura, deformaciones, esfuerzos y desplazamientos. Las temperaturas suministradas para las cargas térmicas van de los 5°C hasta los 50°C. La temperatura mínima se propone así para evitar un cambio de fase del agua.

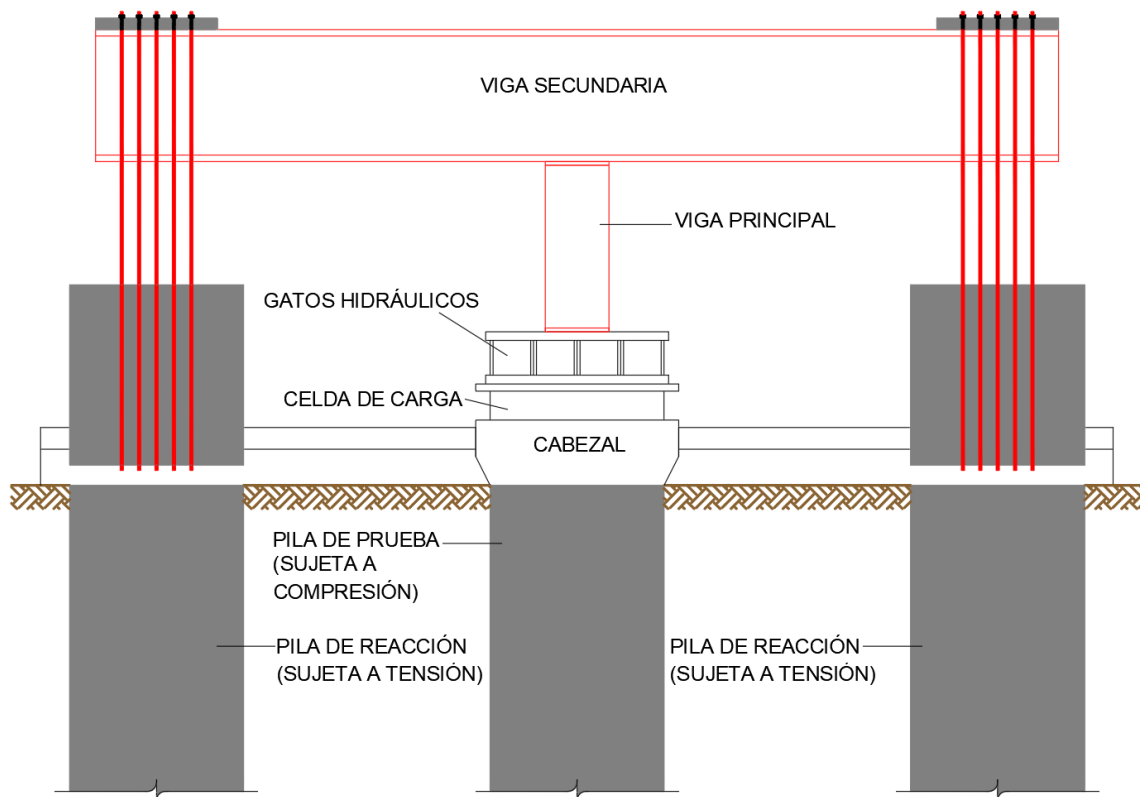


Figura 3.8. Esquema de reacción (adaptado de Sámano *et al.*, 2006)

3.5. Instrumentación y sistema de adquisición de datos

Los Detectores de Temperatura de Resistencia (*RTD*, por sus siglas en inglés) son resistencias que incrementan su valor medido conforme incrementa la temperatura a la que estén sujetos. Por lo tanto, utilizando este tipo de sensores y al medir su resistencia, es posible medir la temperatura del medio en el que estén colocados. Los materiales más comunes de los que están hechos son: cobre, níquel y platino, este último ofrece una relación temperatura-resistencia confiable y lineal. Además, poseen una mayor exactitud y estabilidad en comparación con los termopares. Este tipo de sensores de platino son conocidos como Termómetros de Resistencia de Platino (*PRT*, por sus siglas en inglés)

Los sensores Pt100 son los sensores RTD más comunes, su nombre se debe a que la resistencia a los 0°C es de 100 Ω y poseen un rango de medición de temperatura que va desde los -50°C hasta los 600°C de forma comercial.

Las galgas extensométricas, mejor conocidas como strain gauges, son sensores capaces de medir los desplazamientos. Estos sensores funcionan a partir de la resistividad y geometría del conductor que se encuentre adherido a la probeta o material sometido a un esfuerzo, ya que este se vuelve más largo y fino. Su empleo es adecuado siempre y cuando las deformaciones provocadas se encuentren en un rango elástico, sin llegar a producir la falla o rotura del material. Cabe señalar que, un strain gauge es capaz de medir las deformaciones únicamente en una dirección. En consecuencia, para medir deformaciones en ambas direcciones debe colocarse un arreglo de estos instrumentos según el requerimiento específico de la prueba a realizar.

Por medio de la instrumentación basada en los sensores de medición de desplazamientos y temperatura antes mencionados, se realiza el monitoreo de estos parámetros, así como de la relación carga-desplazamiento en condiciones no isotérmicas, con lo cual se plantea el sistema de instrumentación discutido a continuación.

La instrumentación sugerida para la prueba es la siguiente:

- Sensores de temperatura Pt100
- Sensores de desplazamiento (Strain gauge)
- Celda de carga

La tubería intercambiadora de calor y la bomba de calor geotérmico suministran a la pila el ciclo térmico. Los sensores de temperatura, desplazamiento y la celda de carga se encargarán de realizar las mediciones durante la aplicación del ciclo de carga térmica. En la Figura 3.9 se muestra un esquema de la sección transversal de la pila con el arreglo propuesto de sensores.

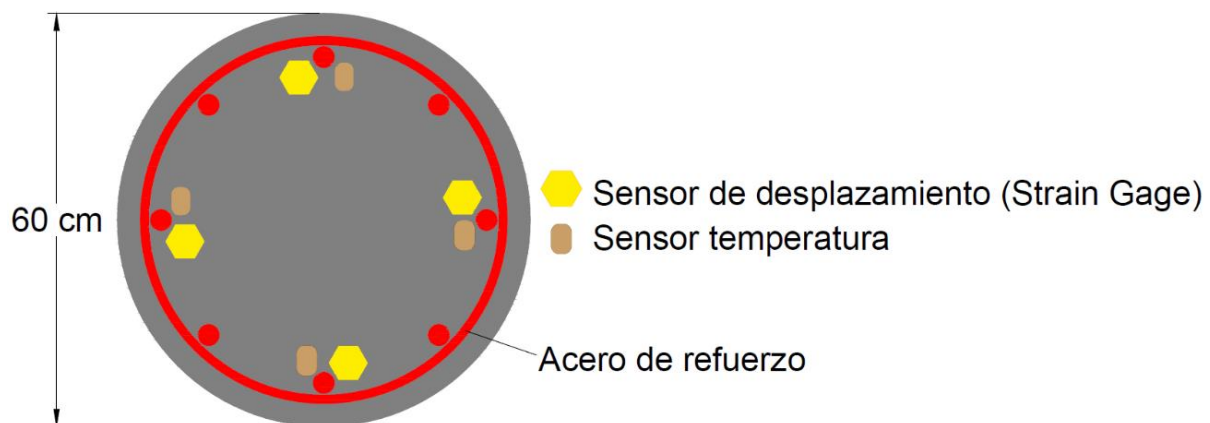


Figura 3.9. Sección transversal de la pila con instrumentación

En la Figura 3.10 se presenta una sugerencia de la distribución de instrumentación (sensores de temperatura y desplazamiento) a lo largo de la pila. Se muestran las dimensiones del elemento y la profundidad a la que se encuentra cada sensor. En el fondo de la perforación se propone colocar una celda de carga y una capa de concreto pobre de 20 cm de espesor.

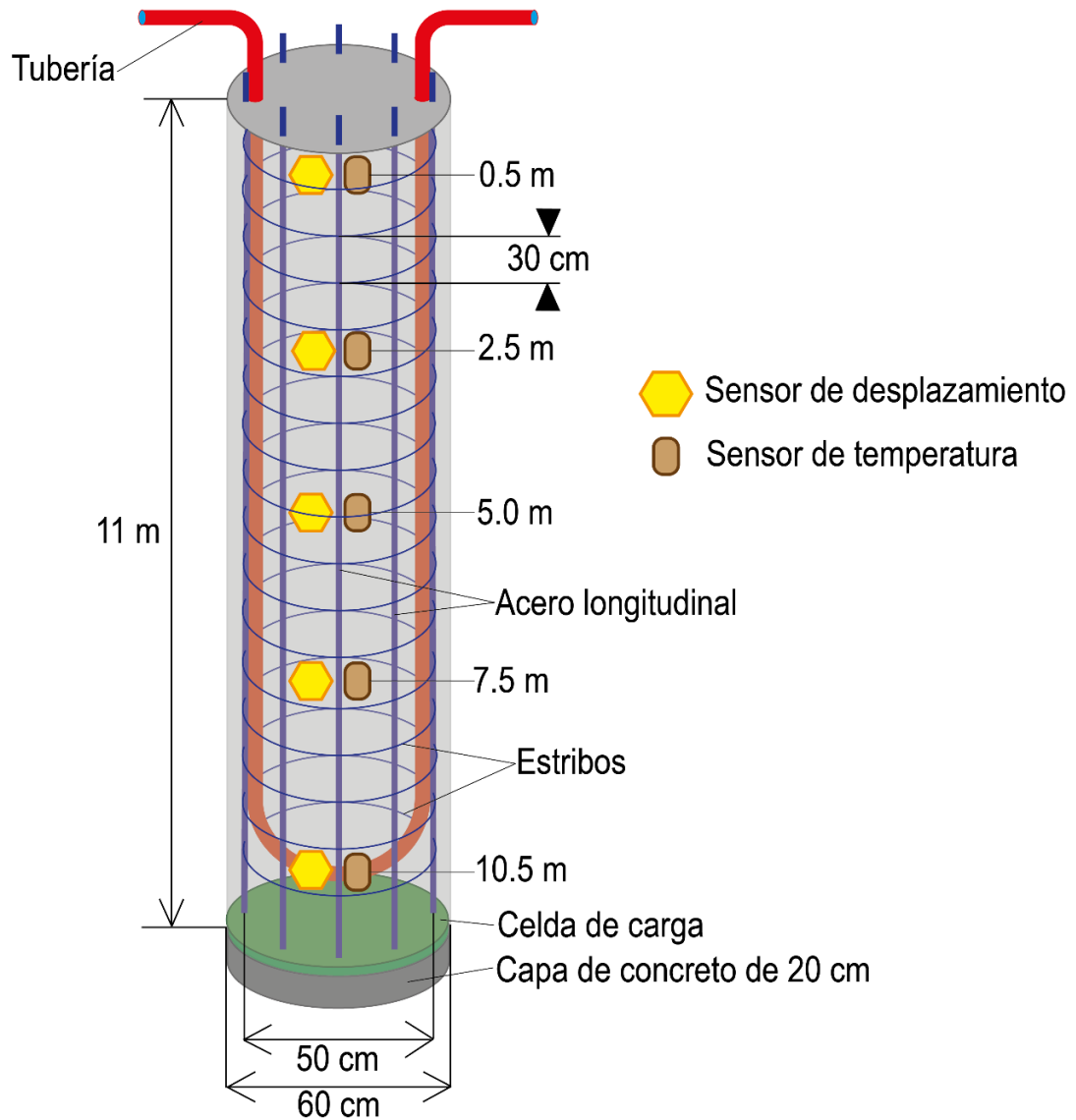


Figura 3.10. Corte longitudinal de la pila de energía con su respectiva instrumentación

4. CASO DE ESTUDIO

El diseño térmico de las pilas de energía consiste en determinar la longitud total requerida para satisfacer las cargas térmicas de la edificación. Estas solicitudes se obtienen a partir del monitoreo de la temperatura durante un periodo de un año, ya que las condiciones atmosféricas dependen de los cambios estacionales. Para ello se toman lecturas cada hora del día durante los 365 días del año, al finalizar la prueba se tendrán 8760 lecturas y con estos valores se determinan los meses de máxima demanda energética. No obstante, la longitud de las pilas no depende de los requerimientos térmicos, sino de las solicitudes geotécnicas y estructurales. Lo anterior representa una limitación importante en el diseño térmico, ya que parámetros como las dimensiones y separación de las pilas están predeterminados. Por lo tanto, no se puede garantizar el suministro total de energía y a menudo se debe implementar un sistema híbrido (pilas de energía y sistema de calefacción convencional). La Figura 4.1 muestra un diagrama de flujo de la metodología propuesta para el diseño térmico de pilas de energía.

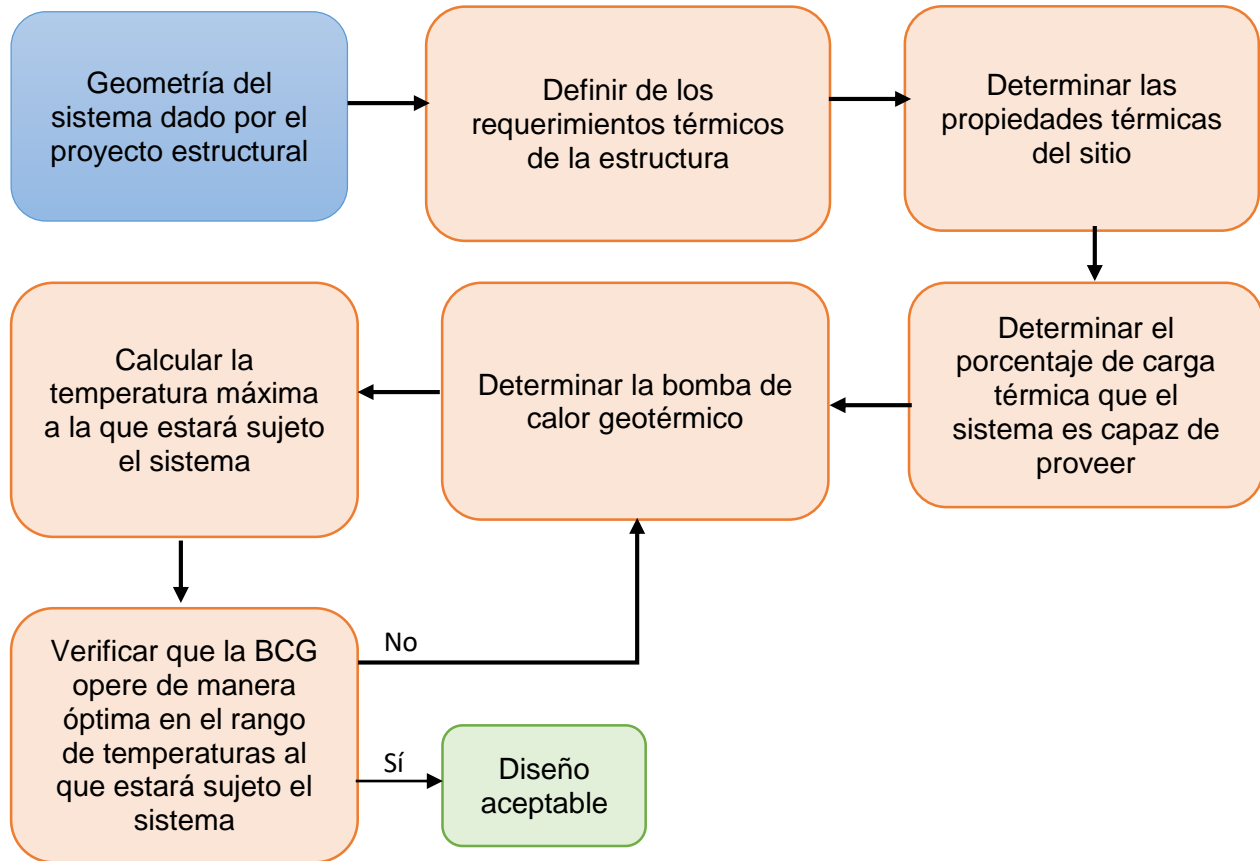


Figura 4.1. Proceso de diseño de las pilas de energía

Con base en la geometría de la pila, los requerimientos térmicos de la estructura y las propiedades térmicas del sitio, es posible determinar la carga térmica que la bomba de calor debe abastecer. Esta requiere operar dentro de un rango de temperatura determinado para funcionar de manera óptima. Para ello, se debe obtener la variación de temperatura tanto en el fluido de entrada y salida como en la periferia de la pila. En este capítulo se efectúa dicho análisis en una pila de energía ubicada en el estado de Jalisco. Para realizar el estudio se implementa un programa en lenguaje de programación R (López Acosta *et al.*, 2022) fundamentado en funciones G, que permite calcular la variación de temperatura a lo largo de un año y la resistencia térmica efectiva del pozo. La variación de temperatura se obtiene con la siguiente ecuación (López Acosta *et al.*, 2022):

$$\Delta T(i) = q(t_i)R_b + \sum [q(t_i) - q(t_j)]G(t_i - t_j) \quad (4.1)$$

donde ΔT es la variación de temperatura en el fluido, q es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud y R_b es la resistencia térmica efectiva del pozo.

4.1. Localización del sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en la zona costera del estado de Jalisco, por lo que el suelo está conformado por depósitos aluviales residuales y sedimentos de playa. El clima en la zona es cálido sub-húmedo con lluvias en verano. El otoño, invierno y primavera son secos y cálidos, sin cambio térmico invernal bien definido. Según el INEGI (consultado en 2022), la temperatura media anual del estado de Jalisco es de 20.5°C, la temperatura más baja se presenta en el mes de enero con 7.0°C y las más altas son de 23.0°C entre los meses de mayo a septiembre. El régimen de lluvias se registra en los meses de junio, julio y agosto, con una precipitación media de más de 1000 mm anuales en las zonas costeras. Los vientos dominantes son en dirección al suroeste. En la Figura 4.1 se muestra la localización geográfica del sitio de estudio.



Figura 4.2. Localización geográfica del sitio de estudio

Del monitoreo realizado en el sitio, se obtuvieron las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias. La Figura 4.2 muestra la variación de la temperatura ambiente en la zona costera de Jalisco. Con este registro se determinó una temperatura media igual a 26.2°C, la cual se toma como valor de referencia.

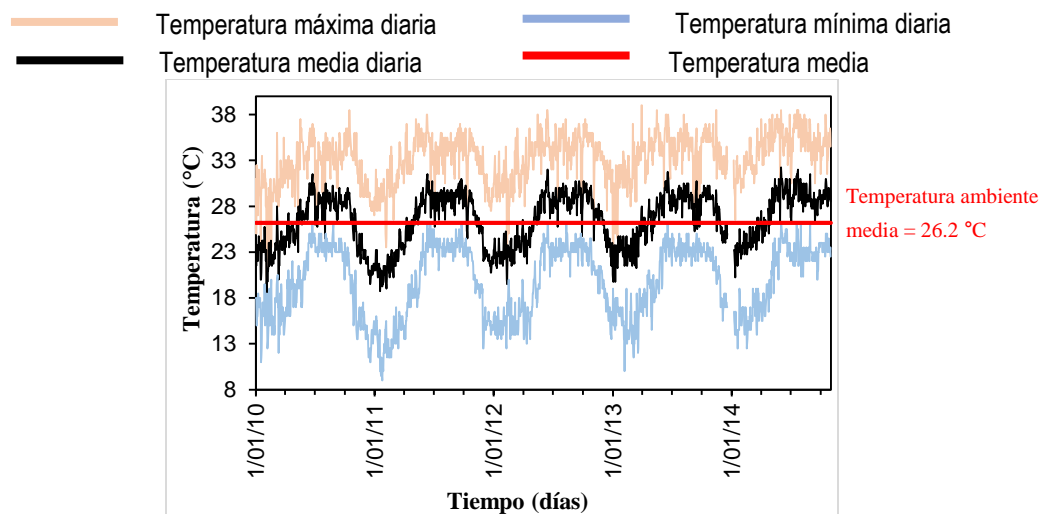


Figura 4.3. Variación de la temperatura ambiente en el sitio de estudio (López Acosta *et al.*, 2022)

4.2. Estratigrafía y propiedades geotérmicas del sitio

Las condiciones del subsuelo de la zona costera de Ciudad (Jalisco) se obtuvieron a partir de los trabajos de exploración que incluyen tres sondeos mixtos de 50 a 70 m de profundidad, en los cuales se mezclaron la técnica de hincado de cono eléctrico en suelos blandos y SPT en estratos de mayor consistencia. A partir de los sondeos realizados se extrajeron especímenes inalterados con muestreo selectivo y se hicieron tres ensayos con phicómetro. Para determinar las propiedades del suelo se efectuaron ensayos de consistencia, contenido de finos y granulometría. Adicionalmente, se realizaron 11 ensayos triaxiales UU y siete de consolidación. La Figura 4.4 ilustra el perfil estratigráfico y las propiedades térmicas de la zona de estudio.

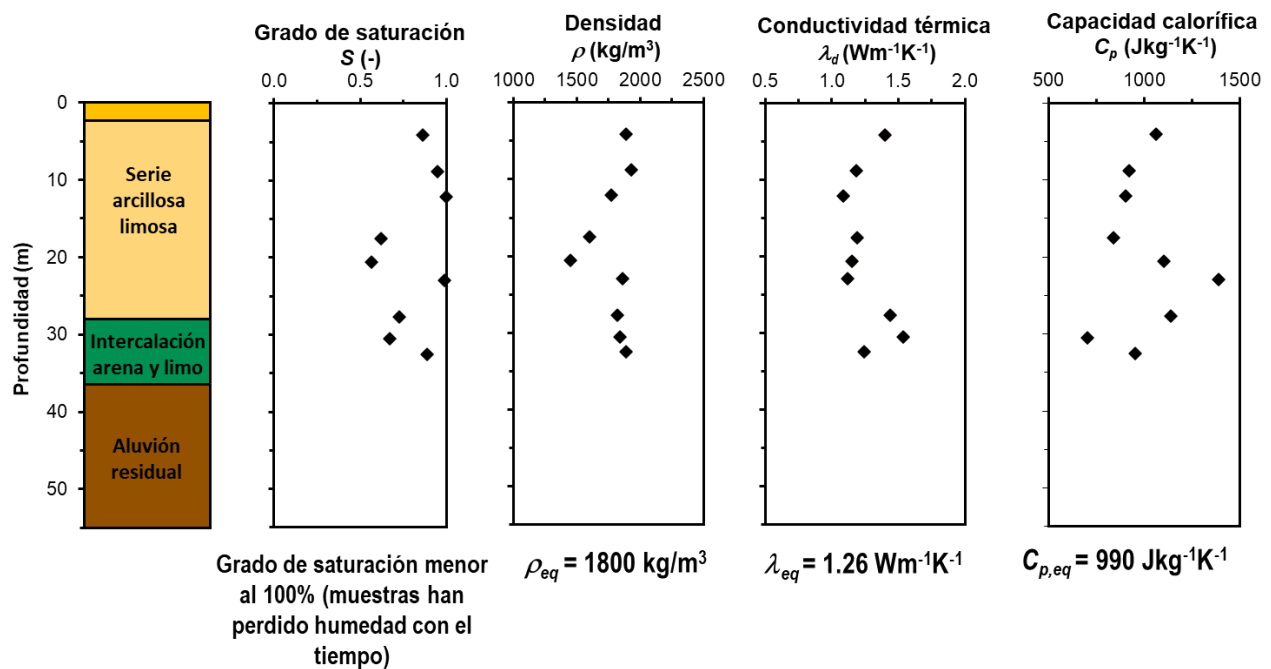


Figura 4.4. Estratigrafía y propiedades geotérmicas del sitio de estudio (López Acosta *et al.*, 2022)

El nivel freático se encuentra a 2.6 m de profundidad. Para estimar las profundidades del aluvión residual se tomaron como referencia los valores medidos en otras muestras.

En la Figura 4.5 se muestra un esquema de la estratigrafía del sitio y las dimensiones de la pila de energía.

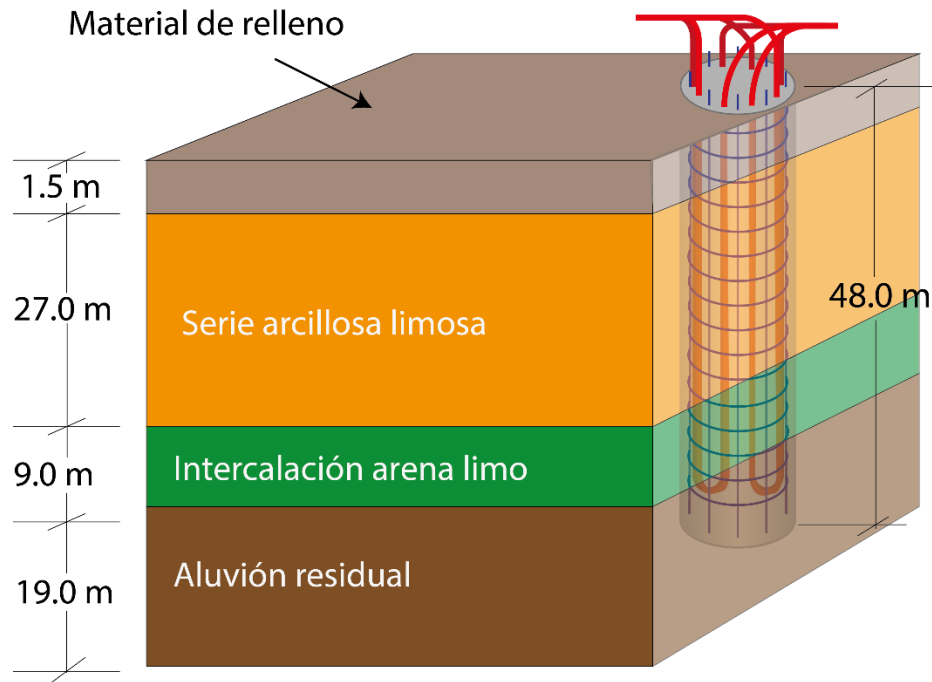


Figura 4.5. Esquema de la estratigrafía del sitio

De las pruebas inalteradas se realizaron ensayos de aguja térmica (ver apartado 2.2), a partir de los cuales se definieron las propiedades geotérmicas del sitio (López Acosta *et al.*, 2022). En la Tabla 4.1 se muestran las propiedades térmicas del suelo, así como los parámetros de la pila (concreto), el fluido y la tubería intercambiadora de calor.

Tabla 4.1. Parámetros empleados en el análisis (López Acosta *et al.*, 2022).

Elemento	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Suelo	Conductividad térmica del suelo	λ_g	1.26	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Capacidad calorífica específica del suelo	$C_{p,g}$	990	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Densidad del suelo	ρ_g	1800	kg m^{-3}
	Difusividad térmica	α_g	7.1E-07	m^2s^{-1}
	Temperatura inicial del suelo	T_0	26.2	$^{\circ}\text{C}$
Tuberías (PEAD DR11)	Diámetro interno de tubería	d_i	0.0219	m
	Radio interno de tubería	r_i	0.01095	m
	Diámetro externo de tubería	d_o	0.0267	m
	Radio externo de tubería	r_o	0.01335	m
	Conductividad térmica de la tubería	λ_p	0.45	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
	Número de tubería	n	8	-

Fluido (agua)	Conductividad térmica del agua	λ_w	0.58	$Wm^{-1}K^{-1}$
	Capacidad calorífica específica del agua	$C_{p,w}$	4185.5	$Jkg^{-1}K^{-1}$
	Densidad del agua	ρ_w	998	$kg\ m^{-3}$
	Viscosidad cinemática del agua	ν	8.03E-07	m^2s^{-1}
	Viscosidad dinámica del agua	μ	1.00E-03	$Pa\ s^{-1}$
	Tasa de flujo	F	18.9	$l\ min^{-1}$
	Velocidad de flujo	v_w	0.836	$m\ s^{-1}$
Pila (concreto)	Diámetro de la pila	d_b	0.8	m
	Radio de la pila	r_b	0.4	m
	Longitud de pila	L	48	m
	Conductividad térmica de la pila	λ_b	1.4	$Wm^{-1}K^{-1}$
	Capacidad calorífica específica de la pila	$C_{p,b}$	4100	$Jkg^{-1}K^{-1}$
	Densidad de la pila	ρ_b	2400	$kg\ m^{-3}$
	Recubrimiento de tuberías	c	0.048	m
	Distancia radial a tuberías	r_c	0.33865	m

La Figura 4.6 muestra el perfil de cargas térmicas para un edificio típico ubicado en zona costera de Jalisco escalado para una pila de energía. Las cargas térmicas positivas indican inyección de calor al suelo (enfriamiento de la edificación), mientras que cargas térmicas negativas indican extracción de calor del suelo. (calentamiento de la edificación).

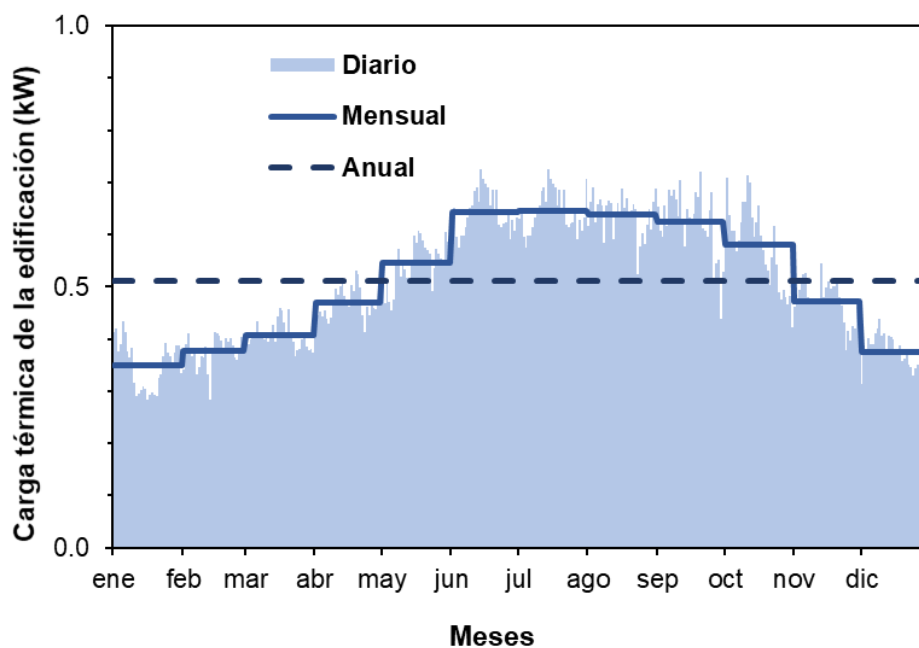


Figura 4.6. Gráfica de cargas térmicas durante un año (López-Acosta *et al.*, 2022)

4.3. Análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor y en la periferia de la pila analizada

Para determinar la variación de temperatura del fluido conductor de calor se emplearon los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) descritos en el capítulo 2. Así, la temperatura de entrada y salida se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$T_{in} = T_f + \frac{Q}{2\rho_f c_{p,f} V} \quad (4.2)$$

$$T_{out} = T_f - \frac{Q}{2\rho_f c_{p,f} V} \quad (4.3)$$

donde T_{in} es la temperatura de entrada, T_{out} la temperatura de salida del fluido, ρ_f y $c_{p,f}$ son la densidad y el calor específico del fluido portador de calor que circula por las tuberías, respectivamente y V es el caudal volumétrico. Las ecuaciones 4.2 y 4.3 se pueden expresar de manera equivalente como:

$$Q = \rho_f c_{p,f} V (T_{in} - T_{out}) \quad (4.4)$$

Para incluir las fluctuaciones horarias en la carga térmica (q) considerada, se aplica el método de superposición a la serie temporal de carga térmica como sigue:

$$\Delta T_n = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{2\pi\lambda_g} [G(F0_n - F0_{(i-1)}) - G(F0_n - F0_i)] \quad (4.5)$$

donde n es el punto del tiempo normalizado en el que se evalúa la superposición y G es la función G calculada para el calor de $F0$ prescrito en la ecuación.

4.4. Consideraciones del análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila y su periferia

Los métodos analíticos utilizados para calcular la temperatura en el fluido y en la periferia de la pila (ver apartado 4.3) consideran que el elemento trabaja de forma individual. Por lo tanto, el perfil de cargas térmicas (Figura 4.6) fue escalado a una sola pila. Dichas cargas corresponden a las de un sistema intercambiador de calor constituido por una pila de energía, una bomba de calor geotérmico y un circuito de tuberías secundario. El sistema está propuesto para operar en los meses de máxima temperatura, inyectando calor al suelo y extrayendo el fluido a una temperatura menor (enfriamiento de la edificación). Según las especificaciones del fabricante, la bomba de calor debe operar

con su máxima eficiencia a una temperatura de 31°C. Así, es importante verificar que el aumento de temperatura debido a la operación del sistema no exceda ese valor.

La pila de energía considerada en el análisis de variación de temperatura corresponde a un elemento con cuatro bucles en doble W, desplantada a 48 m de profundidad y con un diámetro de 80 cm (López Acosta *et al.*, 2022). El caudal considerado para el análisis es de 15 litros por minuto. En la Figura 4.7 se muestra el detalle del arreglo de tuberías en la sección transversal de la pila con cuatro bucles en U.

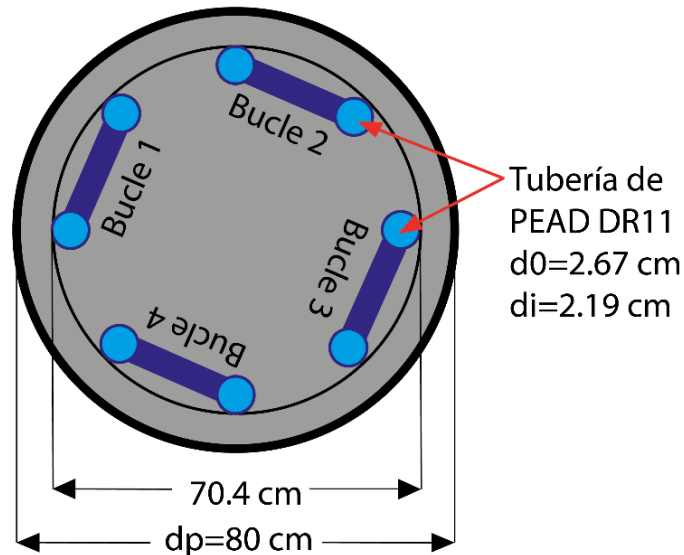


Figura 4.7. Arreglo de cuatro bucles en U en la pila de energía (adaptado de López-Acosta *et al.*, 2022)

Las uniones de la tubería consisten en codos a 90° de polietileno de alta densidad (PEAD). En la Figura 4.8 se muestra el detalle de las uniones de la tubería (López Acosta *et al.*, 2022).

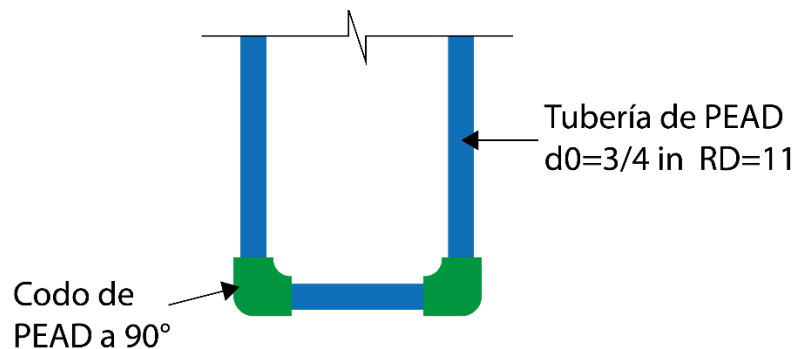


Figura 4.8. Detalle de conformación de los bucles (adaptado de López-Acosta *et al.*, 2022)

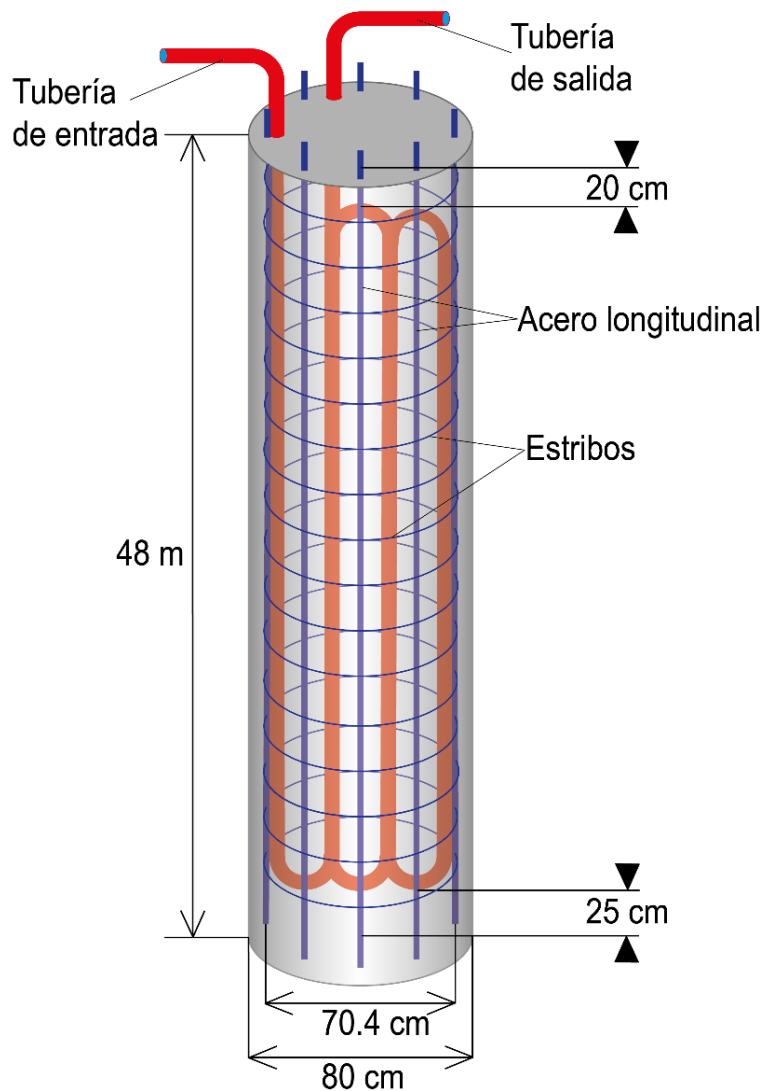
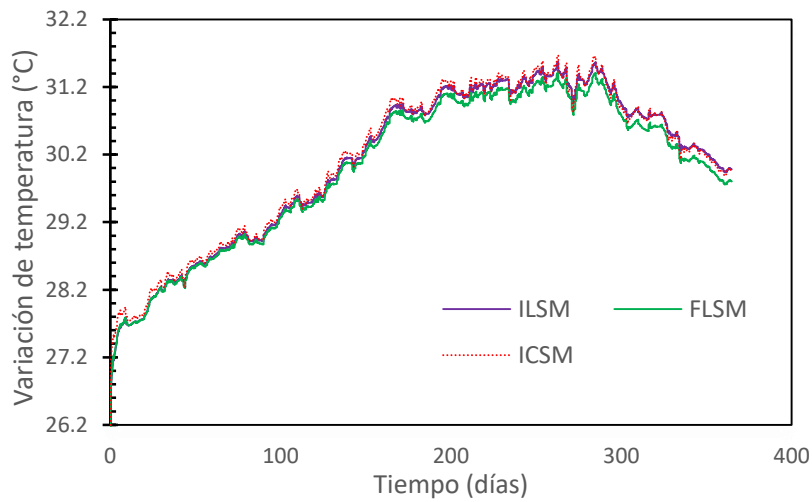


Figura 4.9. Sección longitudinal de la pila

4.5. Resultados del análisis de variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila y su periferia

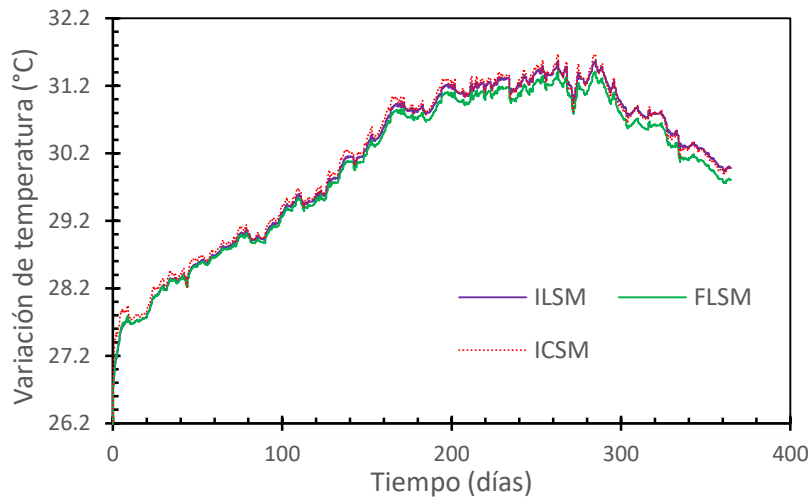
Los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) se programaron en lenguaje R (López-Acosta *et al.*, 2022) para determinar la variación de temperatura en el fluido intercambiador de calor y en la periferia de la pila de energía. En las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se muestran los cambios de temperatura en el fluido de entrada, salida y el promedio medido durante un año. Se observa que, en los días de carga térmica máxima, se produce un aumento de temperatura de hasta 5.4°C. Así, considerando una temperatura inicial de 26.2°C (temperatura media ambiente), se obtiene una temperatura máxima en el fluido igual a 31.6°C. De estos resultados se advierte que, durante la operación del sistema existe un incremento de temperatura respecto a la temperatura de referencia. Siendo los meses de mayor carga térmica el

periodo donde se presentan las temperaturas máximas, tanto en la entrada como en la salida del fluido.



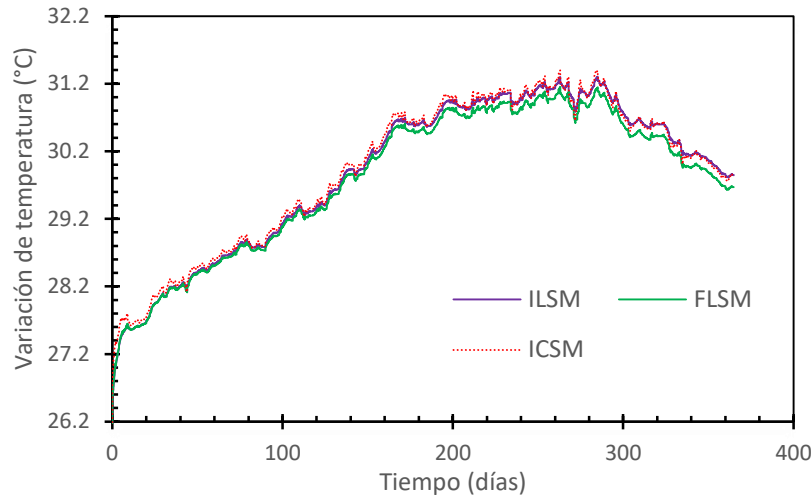
Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.10 Variación de temperatura en el fluido de entrada durante un año



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

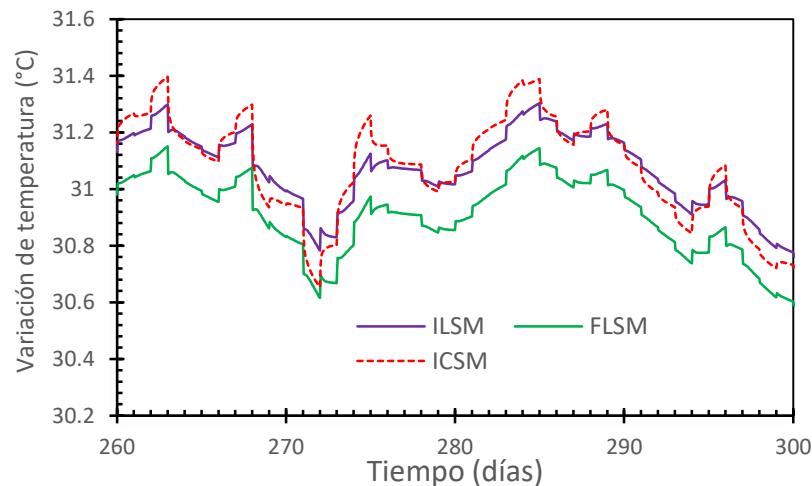
Figura 4.11 Variación de temperatura en el fluido de salida durante un año



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.12 Variación de temperatura en el fluido promedio durante un año

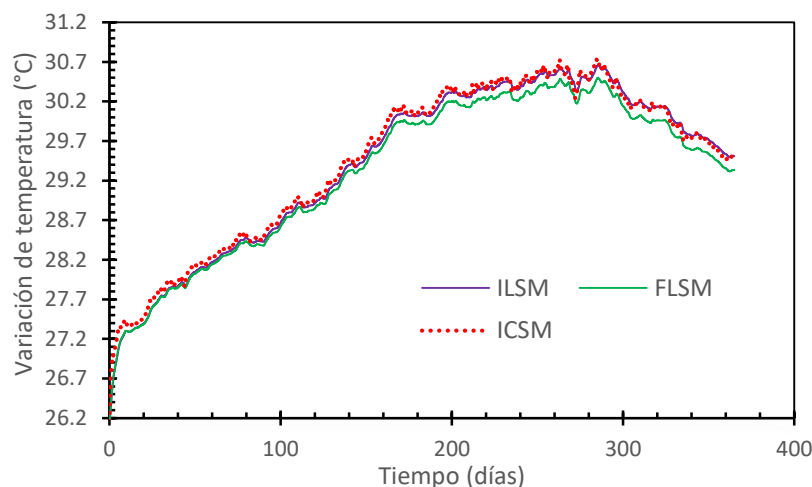
En la Figura 4.13 se muestran a detalle los valores máximos de la variación de temperatura promedio obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), finita (FLSM) y cilíndrica infinita (ICSM). Los modelos (ILSM) y (ICSM) presentan variaciones de temperatura similares y son mayores que las calculadas con el modelo de fuente lineal finita (FLSM). Esto se debe a que, para escalas de tiempo pequeñas, los modelos infinitos desprecian la presencia del suelo circundante y las implicaciones que tiene la extensión finita en un intercambiador de calor real. Asimismo, los modelos de fuente infinitos (línea y cilindro infinitos) tienden a ser más conservadores.



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.13 Valores máximos de la variación de temperatura promedio en el fluido

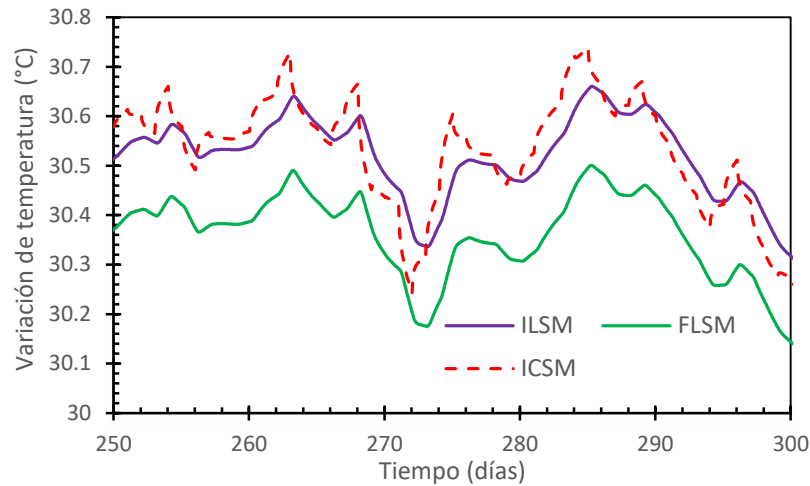
De forma análoga, empleando los modelos de ILSM, FLSM y ICSM se calculó la variación de temperatura en la periferia de la pila. En la Figura 4.14 se muestran los valores obtenidos a lo largo de un año. Se observa que, el incremento máximo se presenta en los meses donde existe mayor carga térmica y tiene un valor igual a 4.5°C .



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.14 Variación de temperatura en la periferia de la pila durante un año

En la Figura 4.15 se muestran los valores máximos de temperatura obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente lineal cilíndrica infinita (ICSM). Al igual que en el caso anterior (Figura 4.13), se observa que los modelos ILSM y ICSM tienen valores similares, mientras que el modelo FLSM supone valores ligeramente menores. En general, los modelos infinitos no consideran la longitud finita de la pila y el suelo que la rodea. Por lo tanto, el método de fuente lineal finita presenta una mejor estimación de la variación de temperatura real. Considerando la variación de temperatura en la periferia de la pila y la temperatura ambiente de referencia igual a 26.2°C , se determinó que la temperatura máxima en los meses de mayor demanda es igual a 30.7°C .



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.15 Valores máximos de la variación de temperatura en la periferia de la pila

En la Figura 4.16 se observa la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida obtenida con el modelo de fuente lineal finita (FLSM). La inyección de calor de la bomba se realiza con una temperatura que aumenta desde los 26.2 °C de referencia hasta los 31.7°C en los meses de máxima demanda. Mientras que la extracción del fluido presenta disminución de hasta 0.5°C respecto a la entrada.

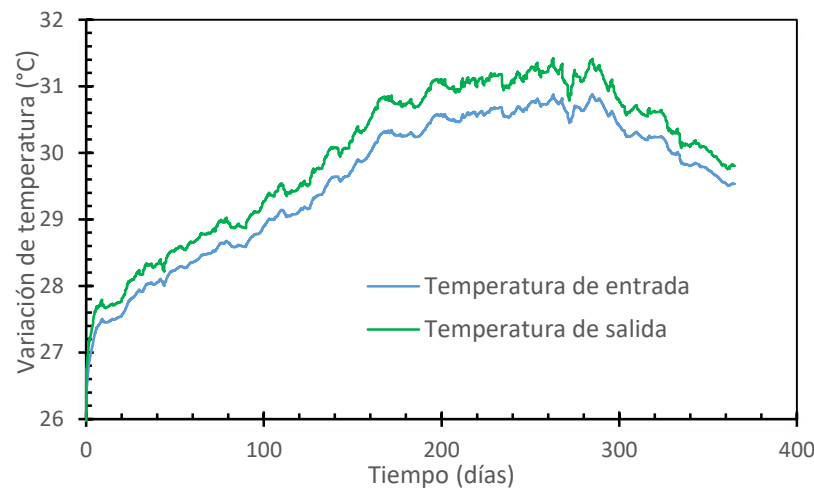
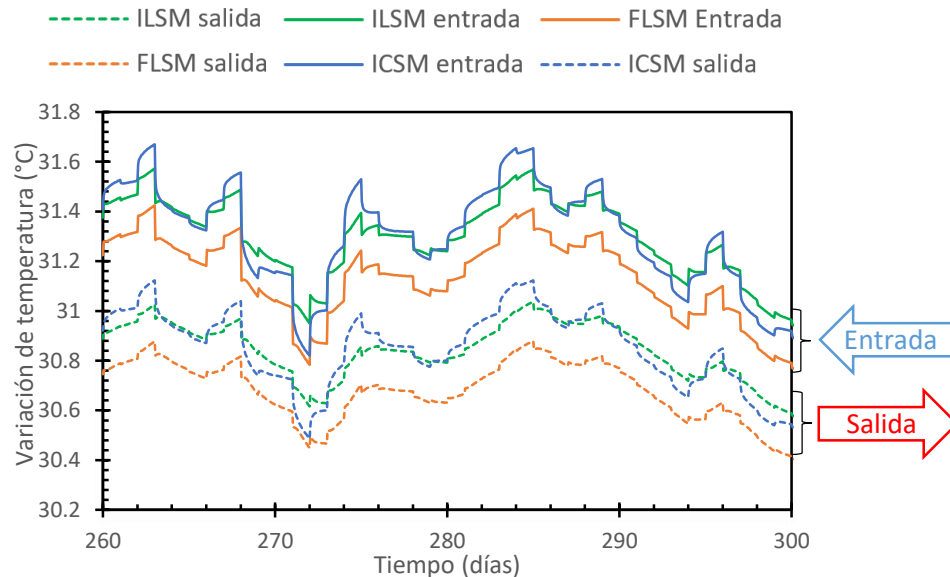


Figura 4.16 Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método (FLSM)

En la Figura 4.17 se muestran los valores máximos de la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida, obtenidos con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM) respectivamente. Se observa que, la diferencia de temperatura en el fluido de salida respecto al de entrada es de 0.5 °C aproximadamente. Este cambio de temperatura se mantiene a lo largo de los 365 días y está relacionado directamente con el caudal del fluido portador de calor, el cual depende del área mecánica. La diferencia entre las temperaturas de entrada y salida es baja, lo cual puede deberse a que el caudal está sobreestimado.



Nota: Donde ILSM: Modelo de fuente lineal infinita; FLSM: Modelo de fuente lineal finita; ICSM: Modelo de fuente cilíndrica infinita

Figura 4.17 Valores máximos de la variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con los métodos (ILSM), (FLSM) y (ICSM)

Para aumentar el cambio de temperatura, es posible disminuir el caudal que alimenta el modelo, siempre y cuando este pertenezca al rango recomendado por el fabricante de la bomba. Asimismo, se pueden realizar conexiones en serie de dos pilas o más para aumentar la diferencia de temperatura y proporcionar un mayor intercambio de calor. No obstante, este procedimiento incrementa las pérdidas por fricción de la tubería, situación que debe ser tomada en cuenta durante el diseño. En la Figura 4.18 se muestra una gráfica con las temperaturas calculadas con el modelo de fuente lineal finita (FLSM), modificando el caudal a 5 lpm para disminuir la temperatura de salida del fluido aproximadamente 2 °C. Lo anterior resulta satisfactorio para la eficiencia del sistema intercambiador de calor.

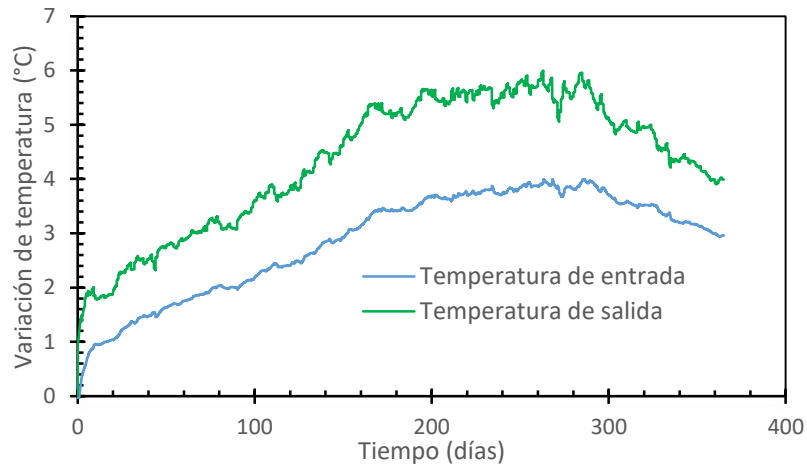


Figura 4.18 Variación de temperatura en el fluido de entrada y salida con el método (FLSM)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

5.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis fue proporcionar una serie de recomendaciones sobre el diseño y construcción de las pilas de energía. Para ello, en el Capítulo 2 se señalaron los aspectos más relevantes sobre el diseño geotécnico y estructural de las pilas de energía. Al respecto, se presentaron las configuraciones más comunes para tuberías intercambiadoras de calor y se propuso una clasificación según su economía, eficiencia de intercambio de calor y rapidez de construcción. Asimismo, se expusieron las distintas soluciones analíticas para el diseño térmico de pilas de energía, describiendo sus principales hipótesis y limitaciones.

En el Capítulo 3 se proporcionaron algunas recomendaciones para la construcción de las pilas de energía. Se presentaron los aspectos más relevantes sobre las tuberías intercambiadoras de calor, específicamente los materiales que son aceptables de acuerdo con la normativa internacional, los métodos de unión y su proceso de instalación. Posteriormente, se describieron las pruebas de purgado que se deben realizar para garantizar la integridad y la apropiada colocación de las tuberías. Asimismo, se expuso el procedimiento para llevar a cabo un correcto control de calidad con base en la normativa internacional. Enseguida, se presentó un sistema de aplicación de cargas para realizar pruebas de carga en pilas de energía en condiciones no isotérmicas, la instrumentación necesaria y la metodología para la adquisición de datos.

En el Capítulo 4 se implementó una metodología propuesta en esta tesis para el diseño térmico de pilas de energía construida en la zona costera del estado de Jalisco. Dicho procedimiento permite determinar si la bomba de calor propuesta cubre la demanda térmica de la edificación. Inicialmente, se calculó la variación de temperatura en la pila para verificar la eficiencia y el rango de temperaturas en el que está trabajando la bomba

de calor. A partir de una serie de ensayos de laboratorio se definieron los parámetros geotérmicos del sitio y de un monitoreo se obtuvieron las cargas térmicas de un edificio en un periodo de un año. Finalmente, se analizó la variación de temperatura en el fluido conductor de calor de la pila y su periferia mediante los modelos de fuente lineal infinita (ILSM), fuente lineal finita (FLSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM). Los distintos métodos se programaron en lenguaje R. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los análisis mencionados anteriormente.

(a) De los modelos analíticos:

Se demostró que la variación de temperatura máxima del sistema se encuentra en el fluido de entrada y es mayor que el límite de temperatura en el que la bomba de calor puede operar. No obstante, este valor corresponde al caso más desfavorable y no es representativo de las condiciones de operación habituales.

Se comprobó que los métodos analíticos de fuente lineal infinita y fuente cilíndrica infinita sobreestiman los valores máximos de temperatura. Dicho comportamiento se debe a que no consideran la longitud finita de la pila y el suelo que la rodea, llevando a soluciones extremadamente conservadoras.

Se demostró que la temperatura en el fluido y en las paredes de la pila aumenta cuando el sistema está trabajando durante los meses de máxima demanda energética.

5.2. Recomendaciones

La principal limitación para implementar las pilas de energía en el país es que existe un desconocimiento sobre las implicaciones para el diseño de este tipo de estructuras eco-amigables. En este trabajo se ha contribuido a la solución de algunos aspectos sobre los criterios de diseño y construcción de las pilas de energía. No obstante, resulta importante continuar investigaciones adicionales que tomen en cuenta lo siguiente:

- Realizar pruebas de carga termo-mecánicas en condiciones no isotérmicas, es decir, que consideren los efectos de la variación de temperatura en las pilas de energía y permitan evaluar las deformaciones adicionales que deben considerarse en el diseño geotécnico y/o estructural de este tipo de cimentaciones.
- Calcular la variación de temperatura en la tubería y en la periferia de la pila con modelos analíticos diferentes a los propuestos en este trabajo, con la finalidad de estudiar la efectividad de dichos modelos y compararlos entre sí, para evaluar la viabilidad de su aplicación.
- Realizar un análisis económico sobre la implementación de pilas de energía, que considere distintas configuraciones de tuberías intercambiadoras de calor. Así como, proponer una clasificación precisa que permita la elección de un arreglo u otro.

REFERENCIAS

- Abuel-Naga, H., Raouf, A. M. I., Raouf, M. I. N., y Nasser, A. G. (2015). Energy piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2 (EG4), 195 – 210.
- Akrouch G. A. (2014). *Energy piles in cooling dominated climates* [Tesis de doctorado, Texas A&M University]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1969.1/152552>
- Amatya, B. L., Soga, K., P. J., Amis, T. y Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62 (6), 503-519.
- ASTM D2683, 2014. “Standard Specification for Socket-Type Polyethylene Fittings For Outside Diameter-Controlled Polyethylene Pipe And Tubing”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D2683, 2013. “Standard Test Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials or Pressure Design Basis for Thermoplastic Pipe Products”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D3035, 2015. “Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe (DR-PR) Based on Controlled Outside Diameter”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM D3261, 2016. “Standard Specification for Butt Heat Fusion Polyethylene (PE) Plastic Fittings for Polyethylene (PE) Plastic Pipe and Tubing”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM D3350, 2014. “Standard Specification for Polyethylene Plastics Pipe and Fittings Materials”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM F876, 2020. “Standard Specification for Crosslinked Polyethylene (PEX) Tubing”, ASTM International. West Conshohocken, PA, 2020.

ASTM F877, 2020. "Standard Specification for Crosslinked Polyethylene (PEX) Hot- and Cold-Water Distribution Systems". ASTM International. West Conshohocken, PA, 2020.

ASTM F1055, 2016. "Standard Specification for Electrofusion Type Polyethylene Fittings for Outside Diameter Controlled Polyethylene and Crosslinked Polyethylene (PEX) Pipe and Tubing". ASTM International. West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM F2080, 2019. "Standard Specification for Cold-Expansion Fittings with Metal Compression-Sleeves for Crosslinked Polyethylene (PEX) Pipe and SDR9 Polyethylene of Raised Temperature (PE-RT) Pipe". ASTM International. West Conshohocken, PA, 2019.

ASTM F2164, 2018. "Standard Practice for Field Leak Testing of Polyethylene (PE) and Crosslinked Polyethylene (PEX) Pressure Piping Systems Using Hydrostatic Pressure". ASTM International. West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D5334-08, 2008. "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure". ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008.

Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C. y Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 59 (3), 237-248.

Bourne-Webb, P., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S. y Loveridge, F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 402-419.

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2), 81-122.

Carslaw, H. S. 1., y Jaeger, J. C. (1959). Conduction of heat in solids. Segunda edición. Oxford: Clarendon Press.

- CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP. (2017). Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques. Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS). *Rev. Fr. Geotech.* 149, 1-120.
- Claesson, J. y Javed, S. (2020). Explicit multipole formula for the local thermal resistance in an energy pile-the line-source approximation. *Energies*, 13 (20): 5445.
- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ... y Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85.
- Faizal, M., Bouazza, A., y Singh, R. M. (2016). An experimental investigation of the influence of intermittent and continuous operating modes on the thermal behaviour of a full-scale geothermal energy pile. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 8, 8–29.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, X. L. y Yang, J. (2008). Thermal performance and ground heat temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2295-2304.
- Groot Viana, M. (2017). *Comportamiento Termodinámico de Pilotes Prefabricados*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, España].
- Ingersoll, L. R. y Plass, H. J. (1948). "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump". *ASHVE Transactions*, 54: 339-348.
- Ingersoll, L., Adler, F., Plass, H. e Ingersoll, A. C. (1951). Theory of Earth Heat Exchangers for the Heat Pump. *ASHVE Transactions* 57, 167-188.
- International Ground Source Heat Pump Association – IGSHPA (2017). Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems. Design and Installation Standards.

- Kavanaugh, S. y Rafferty, K. (2014). Geothermal Heating and Cooling, Design of Ground-Source, Heat Pump Systems. *ASHRAE*, 18, 420.
- Laloui, L., Moreni, M., Fromentin, A., Pahud, D., y Steinmann, G. (1999). Heat exchanger pile: effect of the thermal solicitations on its mechanical properties. *Bulletin d'hydrogeologie*, 17, 331-338.
- Laloui, L. y Di Donna, A. (2011). Understanding the behaviour of energy geo structures. *Civil Engineering*, 164 (4), 184–191.
- Laloui, L., Nuth M. y Vulliet L. (2015). Capítulo 16. *Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile*. Ground Improvement Case Histories, Butterworth-Heinemann. 515-535.
- Li, M., Zhu, K. y Fang, Z. (2016). *Analytical methods for thermal analysis of vertical ground heat exchangers*. Advances in Ground-Source Heat Pump Systems, 157–183.
- López-Acosta N. P. y Barba-Galdámez D.F. (2020). Recomendaciones para construcción de estructuras termoactivas. Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- López-Acosta N. P. y Barba-Galdámez D. F. (2022). Reporte fotográfico: Acompañamiento en la construcción de una pila de reacción equipada para funcionar como pila de energía para la ejecución de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en la zona costera del Estado de Jalisco.
- López-Acosta N. P., Rivera-López A.G. y Barba-Galdámez D.F. (17-19 de noviembre del 2022). Modelación analítica del comportamiento térmico de una pila de energía en México. [Ponencia]. XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Guadalajara, Jal. México.

- Loveridge, F. (2012). The Thermal Performance of Foundation Piles used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems. [Tesis de doctorado, University of Southampton, Reino Unido].
- Loveridge, F. y Powrie, W. (2013). Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. *ICE - Geotechnical Engineering*, 166, 178-196.
- Loveridge, F. y Powrie, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57. 554-564.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.060>
- Loveridge, F., McCartney, J. S., Narsilio, G. A y Sánchez M. (2020). Energy geostructures: A review of analysis approaches, *in situ* testing and model scale experiments. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 22.
<https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.100173>
- Lu, Q., y Narsilio G. A. (2019). Cost Effectiveness of Energy Piles in Residential Dwellings in Australia. *Current Trends in Civil & Structural Engineering* 3 (3), 1-6.
- Luo, J., Rohn, J., Bayer, M., Priess, A. y Xiang, W. (2014). Analysis on performance of borehole heat exchanger in a layered subsurface. *Applied energy*, 123, 55-65.
- Luo, J., Zhao, H., Gui, S., Xiang, W., Rohn, J. y Blum, P. (2016). Thermo-economic analysis of four different types of ground heat exchangers in energy piles. *Applied Thermal Engineering*, 108, 11–19.
- Makasis, N., Narsilio, G. y Bidarmaghz, A. (2017). Optimising the design of energy piles using machine learning. ICSMGE 2017 - 19th *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017-September (p. 3455-3458).

- Moel, M., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., y Sun, J. 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.
- Murphy, K. D., McCartney, J. S. y Henry, K. S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10 (2), 179-195.
- Park, S., Lee, D., Choi, H. J., Jung, K. y Choi, H. (2015). Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger). *Energy*, 81, 56-66.
- Philippe, M. y Michel Bernier, P. D. (2010). Vertical Geothermal Borefields. *ASHRAE Journal*, 20-28.
- Rivera-Martínez A. (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.
- Rotta Loria A., Vadrot, A. y Laloui, L. (2018). Analysis of the vertical displacement of energy pile groups. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 16, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.04.001>
- Rotta Loria. A. F. (2019). Performance-based Design of Energy Pile Foundations. *The Journal of the Deep Foundations Institute*, 12 (2), 94–107.
- Sámano, A. A., Paniagua, W. I. e Ibarra E., (2012). Pruebas de carga estáticas y dinámicas en pilas y pilotes para una Refinería en Minatitlán, Veracruz: comparaciones de diseño y resultados experimentales. XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Volumen 1.

- Sanner, B.B., Hellström, G., Spitler, J.D., & Gehlin, S.E. (2005). Thermal Response Test Current Status and World-Wide Application-annotated. *Proceedings World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- SENER y AIE. (2011). *Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos*. British Embassy Mexico City.
- SIA-D0190, 0190. 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, 2005.
- Soga, K. y Rui, Y. (2016). Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. *Energy geostructures*, 185-221.
- Spitler, J. D. y Bernier M. (2016). Vertical borehole ground heat exchanger design methods. *Woodhead Publishing*, 29-61.
- Sutman, M. (2016). Thermo-Mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling. [Tesis de doctorado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University].
- Yoon, S., Lee, S.-R., Xue, J., Zosseder, K., Go, G.-H. y Park, H. (2015). Evaluation of the thermal efficiency and a cost analysis of different types of ground heat exchangers in energy piles. *Energy Conversion and Management*, 105, 393–402.

ANEXO A. Estado del arte de pruebas de carga y desempeño térmico en pilas de energía en el mundo

A continuación, se detallan algunas pruebas de carga y de desempeño térmico *in situ* realizadas en pilas de energía, así como los resultados obtenidos.

- **Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza**

Esta prueba de campo se llevó a cabo en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) (Laloui *et al.*, 2006), durante la construcción de un nuevo edificio en el campus. El edificio de cuatro pisos tiene 100 m de longitud y 30 de ancho. La cimentación consiste en 97 pilas desplantadas aproximadamente a 25 m de profundidad. La pila en la que se realizó la prueba de carga está ubicada en el borde del edificio, que estaba en construcción durante el período de prueba y sirvió como elemento de carga e intercambiador de energía. Las pilas restantes que soportaban la construcción se desempeñaron únicamente como elementos de carga, es decir, solo se cargó térmicamente la pila de prueba. La pila de 0.88 m de diámetro y 25.8 m de longitud se adaptó con una tubería de polietileno de alta densidad en forma de U, colocada en el acero de refuerzo. La instrumentación instalada en la pila incluye sensores de fibra óptica, extensómetros y una celda de carga ubicada en la base de la pila.

El ensayo se llevó a cabo en etapas que coincidían con la finalización de cada piso durante la construcción del edificio (Figura Anexo A.1). En la primera etapa (*T1*) se aplicó una carga térmica de forma independiente a la carga mecánica para analizar la respuesta del elemento sin restricciones en la cabeza. Durante la prueba se aplicó un ciclo térmico de 12 días de calentamiento y 16 días de recuperación. Los siguientes ensayos consistieron en ciclos de calentamiento/recuperación y, posteriormente, la aplicación de

una carga mecánica. La carga máxima impuesta debido al peso propio del edificio fue de aproximadamente 1300 KN (Laloui *et al.*, 2006). El cambio de temperatura aplicado en el primer ensayo fue de 21°C y en etapas posteriores fue de 15°C.

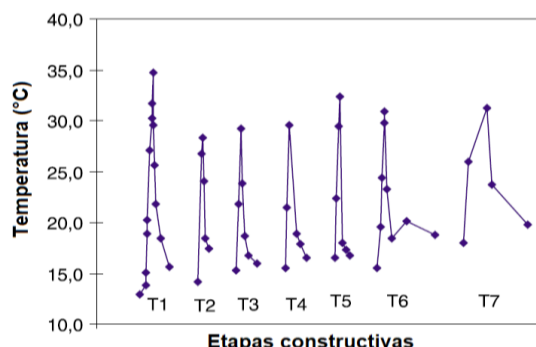


Figura A.1. Cargas térmicas aplicadas (adaptado de Laloui *et al.*, 2003)

En la Figura A.2a se muestran los esfuerzos verticales obtenidos mediante la simulación numérica y su comparación con las mediciones experimentales al aplicar un incremento de carga $\Delta T=13.4$ °C. Se observa que la pila sin carga mecánica en la cabeza tiende a dilatarse. La Figura Anexo A.2b presenta los esfuerzos verticales efectivos durante el ciclo de calentamiento-recuperación. En este caso, el elemento no es completamente libre de moverse debido a la fricción lateral generada con el suelo circundante y el estrato de suelo rígido ubicado en la punta. Por lo tanto, las restricciones impuestas a la deformación produjeron un aumento significativo en los esfuerzos térmicos.

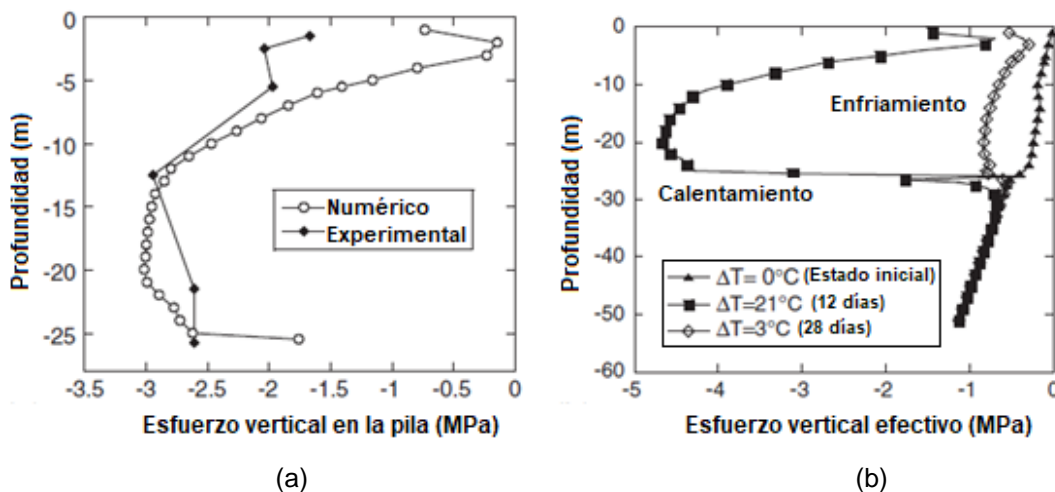


Figura A.2. Esfuerzos térmicos verticales en EPFL para: (a) carga térmica de 13.4°C y (b) Durante el ciclo calentamiento-enfriamiento. (Laloui *et al.*, 2006)

La Figura A.3 muestra los esfuerzos verticales medidos durante la séptima etapa de construcción (T7) y los esfuerzos obtenidos mediante la simulación numérica. La carga mecánica generó esfuerzos mayores en la parte superior de la pila (del orden de 1.3 MPa) y se redujeron con la profundidad. En cambio, las sollicitaciones térmicas produjeron esfuerzos de compresión mayores a lo largo de la pila. Al respecto, la carga térmica

generó esfuerzos de 1.2 MPa en la cabeza del elemento y alrededor de 2 MPa en la punta. En las Pruebas 5 (*T5*) y 6 (*T6*) se observó que un incremento de temperatura de 1°C resulta en un incremento de carga de aproximadamente 100 kN. En consecuencia, la carga axial total en el pilote es dos veces mayor que la debida a una carga puramente mecánica, con una sollicitación mayor en la punta (Laloui *et al.*, 2006). Por otra parte, la carga mecánica se modeló aplicando incrementos de esfuerzo vertical a la parte superior de la pila. El modelo puede reproducir la disminución de los esfuerzos verticales mecánicos con la profundidad, así como el aumento de los esfuerzos verticales inducidos térmicamente con la profundidad (Laloui *et al.*, 2006).

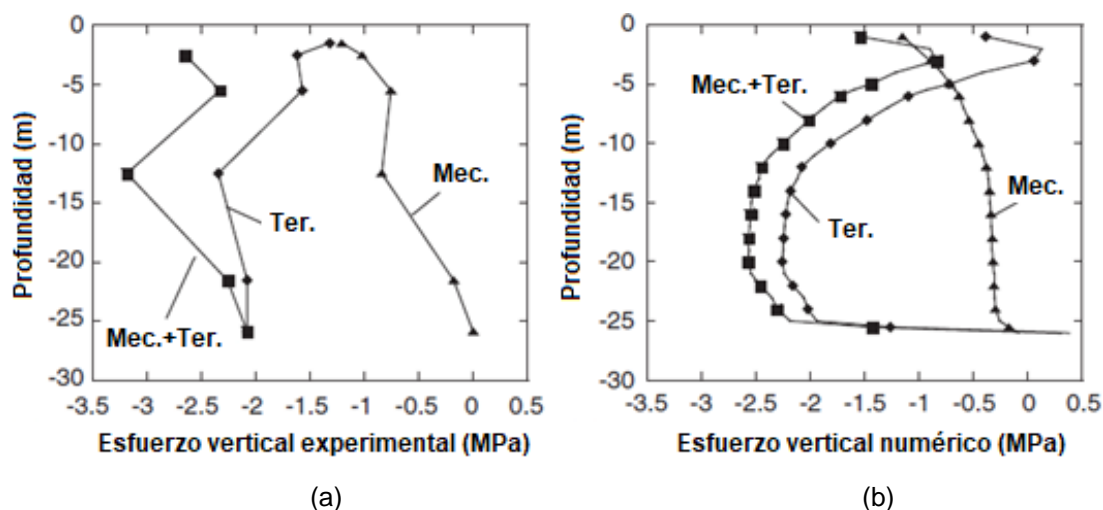


Figura A.3. Esfuerzos termo-mecánicos verticales en la pila: (a) resultados experimentales; (b) Simulaciones numéricas. (Laloui *et al.*, 2006)

- **Pruebas de carga en pilotes prefabricados en Valencia, España**

Una serie de pruebas fueron realizadas en un pilote prefabricado de 17.4 m de longitud y una sección transversal cuadrada de 0.35 m por lado (Groot Viana, 2017). Al centro del pilote se colocó una tubería de acero empleada para el sistema suministrador de calor. Este sistema consta de dos tuberías con arreglo en U y un relleno a base de mortero de alta conductividad térmica. La estratigrafía del sitio estaba confirmada por un relleno superficial de grava arenosa compactada de 1 m, seguido de una capa de arcilla dura de 1 m, un estrato de arcilla orgánica blanda con un espesor de 6 m, un estrato de arena suelta con un espesor de 3 m y por debajo de éste un depósito de gravas arenosas. El nivel de aguas freáticas se encontró a los 2 m de profundidad. El elemento fue instrumentado con sensores de temperatura y sensores de fibra óptica adaptados al refuerzo transversal a diferentes profundidades. La carga mecánica se aplicó con una prensa hidráulica, mientras que la carga térmica fue aplicada por medio de un sistema reversible que emplea una bomba de calor.

En el pilote se realizaron cuatro pruebas diferentes para caracterizar su comportamiento termo-mecánico. Se efectuaron dos pruebas de carga estática en condiciones

isotérmicas, con la finalidad de evaluar la capacidad de carga del pilote, sus deformaciones al ser sometido a una carga axial, las cargas internas y las transmitidas al terreno a través del fuste y de la punta. Esta última se realizó aplicando una carga mecánica constante de 1000 kN hasta la descarga total del elemento. En la siguiente prueba se determinaron las características térmicas del pilote inyectando calor a diferentes temperaturas y midiendo los desplazamientos en la cabeza del pilote, deformaciones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno. Las cargas térmicas se aplicaron a una carga constante de 1000 kN. La última prueba consistió en simular las cargas de un edificio de oficinas durante 15 días consecutivos para analizar el funcionamiento del sistema en la climatización de espacios. En este ensayo se midió la evolución de las temperaturas en el interior del pilote, los movimientos en la cabeza, deformaciones, tensiones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno.

En la Figura A.4a se muestran las gráficas correspondientes a los desplazamientos verticales y en la Figura A.4b los desplazamientos horizontales en la cabeza del pilote durante la prueba de caracterización térmica del sistema. Se aprecia que al calentar el pilote el elemento tiende a expandirse. La evolución de los desplazamientos corresponde a las etapas de las potencias inyectadas. El levantamiento del pilote no se observa inmediatamente, evoluciona conforme se aplican las variaciones de temperatura. Los movimientos horizontales también responden a los escalones de carga térmica específicamente, a las variaciones de temperatura.

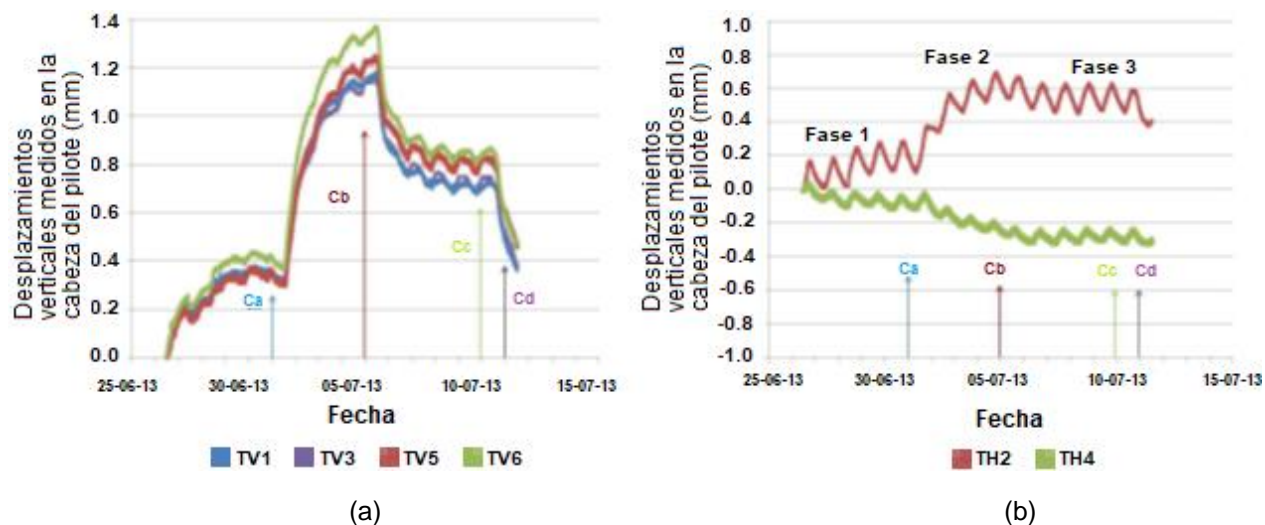


Figura A.4. Desplazamientos detectados en la cabeza del pilote durante la prueba de caracterización térmica del sistema: (a) Desplazamientos verticales; (b) Desplazamientos horizontales. (Groot Viana, 2017)

En la Figura A.5 se observa que el alargamiento del pilote debido a la carga térmica con una carga axial de 1000 kN es de 1.6 mm, lo cual corresponde a la dilatación del pilote debida a la inyección de calor (Groot Viana, 2017).

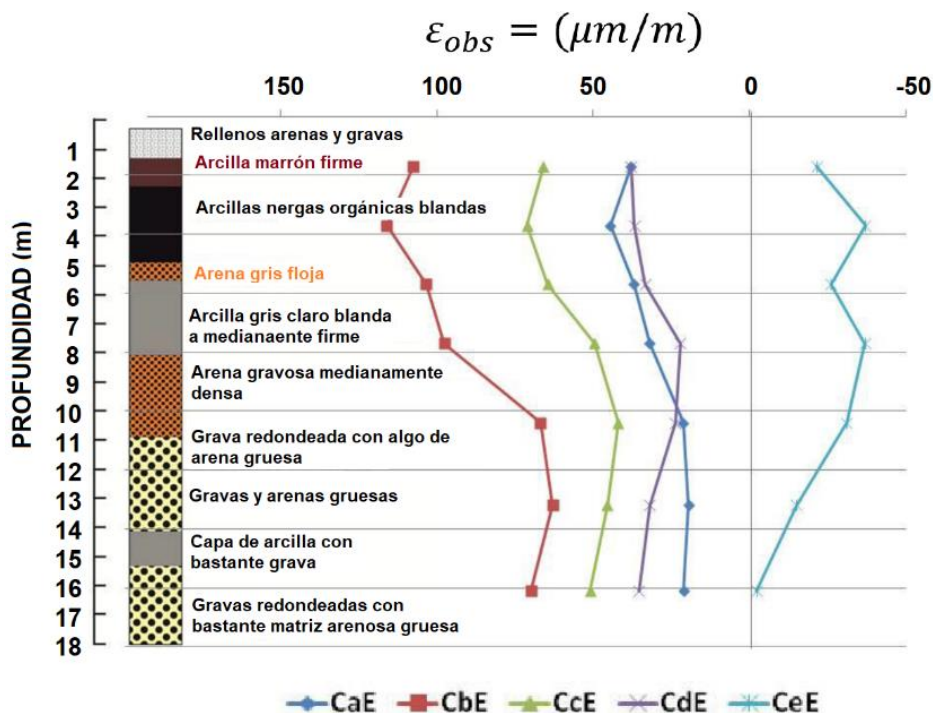


Figura A.5. Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ensayo C (extensómetros). (Groot Viana, 2017)

- **Edificio de la Academia de la fuerza aérea de los Estados Unidos**

En la Academia de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos se construyó un edificio de un solo piso que funciona como instalaciones de baño (Murphy *et al.*, 2015). La cimentación está conformada por ocho pilas de 0.61 m de diámetro y 15.2 m de longitud. La pila se equipó con dos tuberías continuas de polietileno de alta densidad. La instrumentación se incorporó únicamente en tres elementos, consistió en extensómetros y termopares ubicados a distintas profundidades de la cimentación.

La Figura A.6 muestra las curvas de las deformaciones axiales a diferentes profundidades durante la prueba TRT y en su respectivo ciclo de calentamiento/recuperación. El ensayo se realizó con el edificio ya construido y se monitorearon las deformaciones a diferentes profundidades. Se observa que, conforme la temperatura incrementa, los esfuerzos térmicos axiales se vuelven más negativos, lo que indica expansión. Las fluctuaciones en la deformación térmica axial después de que se detuvo el calentamiento se correlacionan bien con los cambios observados en la temperatura de la parte superior debido a los cambios en la temperatura de la superficie. Los extensómetros cerca de la superficie de cada cimentación instrumentada muestran la mayor variación, ya que este es el rango de profundidad que está sujeto al mayor cambio de temperatura.

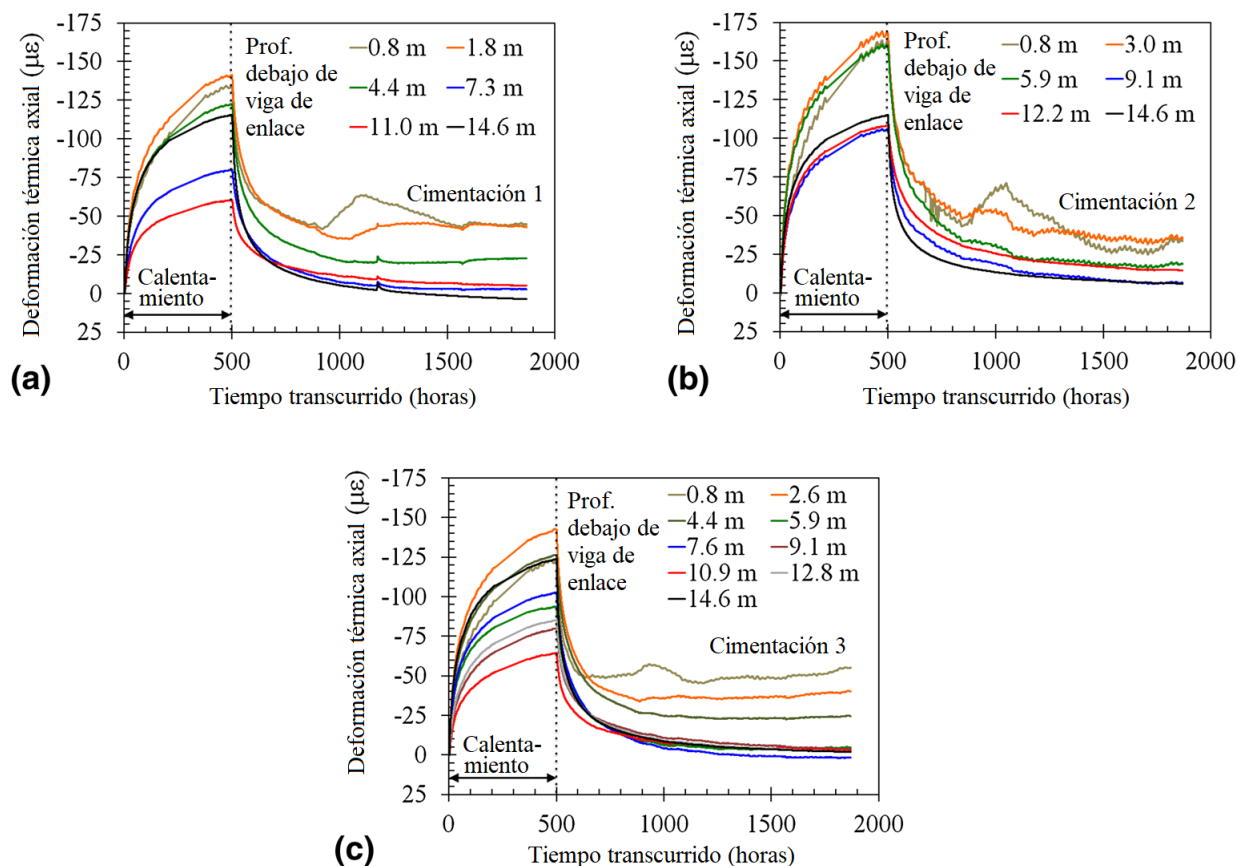


Figura A.6. Deformaciones axiales térmicas en el tiempo durante la prueba de respuesta térmica en la fase de calentamiento y posterior recuperación: (a) cimentación 1, (b) cimentación 2 y (c) cimentación 3 (Murphy *et al.*, 2015)

En la Figura A.7 se muestran los perfiles de deformaciones térmicas axiales promedio de las cimentaciones 1, 2 y 3, en su respectivo ciclo de calentamiento y recuperación. En la cimentación 1, localizada fuera de la huella del edificio, las fluctuaciones de temperatura ocurren sólo cerca de la superficie y es probable que se deban al clima cálido. En la cimentación 2, ubicado debajo de la losa de cimentación y al centro de esta, los cambios de temperatura cerca de la parte superior del pozo corresponden al aumento de la temperatura de la superficie durante el verano. La temperatura del subsuelo en el fondo del pozo experimentó un incremento de aproximadamente 2°C a una profundidad de 8 m, probablemente debido al funcionamiento de la cimentación. El calentamiento de la cimentación produjo un aumento de la temperatura en el suelo circundante a ellas.

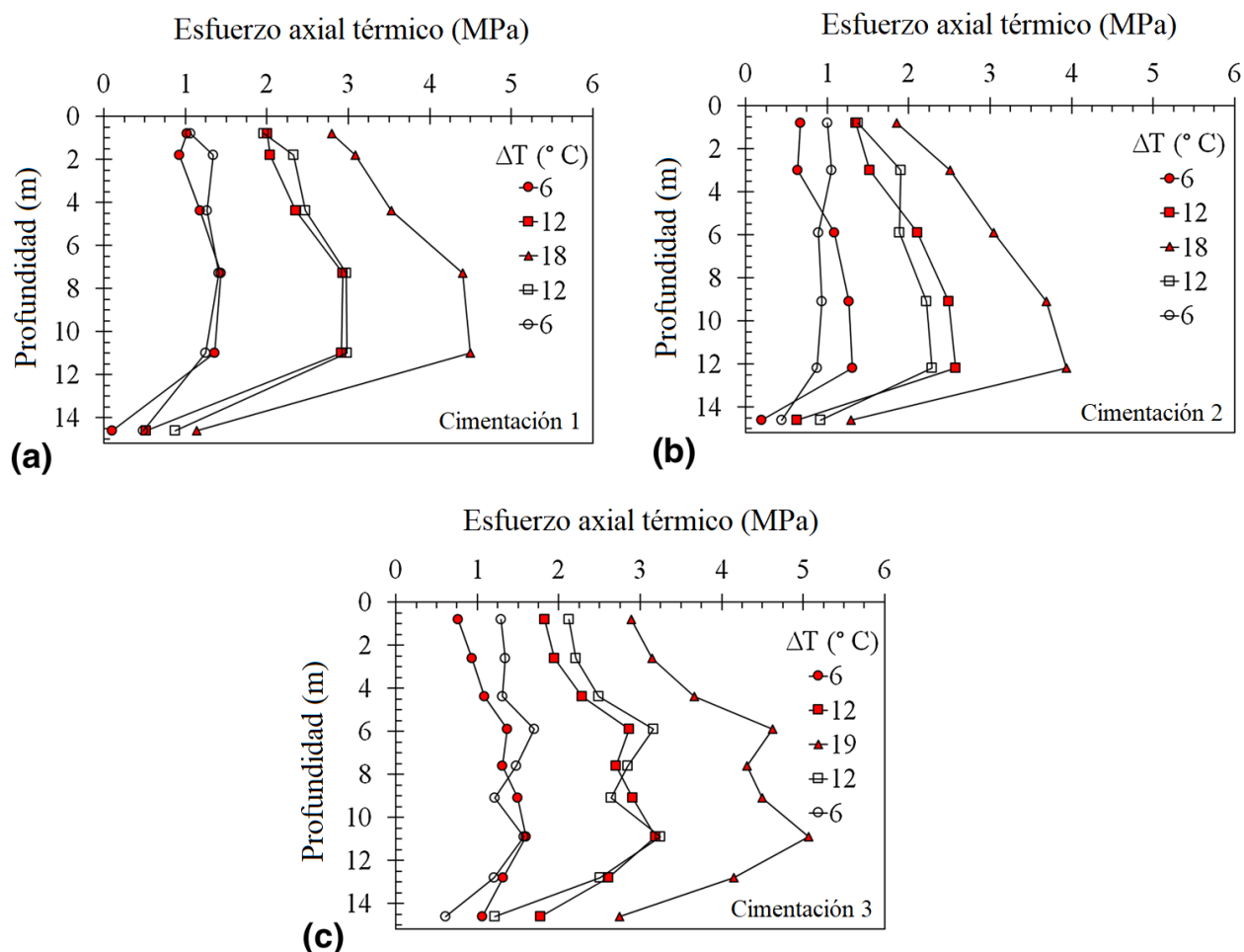


Figura A.7. Perfiles de deformaciones axiales térmicas para diferentes cambios de temperatura en las cimentaciones durante el calentamiento: (a) Perforación 1, (b) Perforación 2 y (c) Perforación 3 (Murphy *et al.*, 2015)

• Sistema de calefacción y refrigeración en Shanghái, China

Gao *et al.* (2008) realizaron un estudio comparativo entre distintas configuraciones de tuberías intercambiadoras de calor para determinar su eficiencia. El rendimiento de la transferencia de calor se evaluó mediante un método numérico que combina la convección y la conducción entre el fluido de la tubería, el concreto de la pila y el suelo que la rodea. El suministro de agua en las tuberías se estabilizó a una temperatura de 35°C. En cambio, la tasa de flujo se controló en tres niveles: 0.342 m³/h, el doble y el triple. Empleando un sistema de instrumentación se determinó la eficiencia de la pila midiendo la transferencia de calor y el valor máximo de energía producida.

El tipo más eficiente de intercambiador de calor para cimentaciones a base de pilas de energía se elige en función de los datos experimentales y los resultados numéricos. Así, los datos experimentales proporcionan el valor máximo de producción de energía. La Tabla A.1 muestra los resultados experimentales del rendimiento de cuatro

intercambiadores de calor con diferentes configuraciones de tuberías (Gao *et al.*, 2008). Con la finalidad de evaluar el efecto del flujo de agua en la transferencia de calor, la pila con tubería en W fue probada con la mitad del caudal de referencia y con caudal doble. La pila en U fue probada con caudal de referencia únicamente, mientras que las pilas con tuberías en doble y triple U fueron probadas con caudal doble. Se observa que el mayor coeficiente de transferencia de calor fue obtenido en la pila con arreglo en triple U y el menor corresponde al elemento con arreglo U simple.

Tabla A.1. Rendimiento de pilas de energía a partir de datos experimentales (Gao *et al.*, 2008)

Tipos de arreglo	Temperatura de entrada t_{in} (°C)	Temperatura de salida t_{out} (°C)	Diferencia de temperatura Δt (°C)	Caudal L ($m^3 h^{-1}$)	Energía de salida Q_1 ($W m^{-1}$)	Coefficiente de transferencia de calor K ($W m^{-1} °C^{-1}$)
W	35.02	29.88	5.14	0.342	83.05	5.84
W (doble L)	34.79	3.88	2.91	0.342 x 2	94.25	6.23
U	35.13	31.56	3.57	0.342	57.84	3.891
Doble U	35.08	32.3	2.78	0.342 x 2	89.53	5.78
Triple U	34.88	32.63	2.25	0.342 x 2	108.07	6.947

En la Figura A.8 se observa una gráfica comparativa de los datos experimentales y de la simulación numérica, de la cual se obtiene que la producción de energía absoluta en la tubería con arreglo de triple U es mayor, seguida por la de doble U, la de W con doble caudal, la de W con caudal base, la U simple y W con medio caudal base. Con base en el caudal de referencia de 0.342 m³/h, las pilas con tuberías con arreglo de U doble y triple tienen caudal doble y triple, respectivamente. Sin embargo, su producción de energía absoluta es un 28% y un 56% mayor que la del tipo en forma de W con el caudal de referencia, respectivamente. La producción de energía de la pila con arreglo en W con caudal doble es sólo 10% mayor que con el caudal de referencia, mientras que, para el tipo con tubería en W con el caudal de referencia, la salida de energía es un 43% mayor que la del medio caudal. Los autores señalan que la pila con tubería con arreglo en W y con caudal de referencia es la más eficiente.

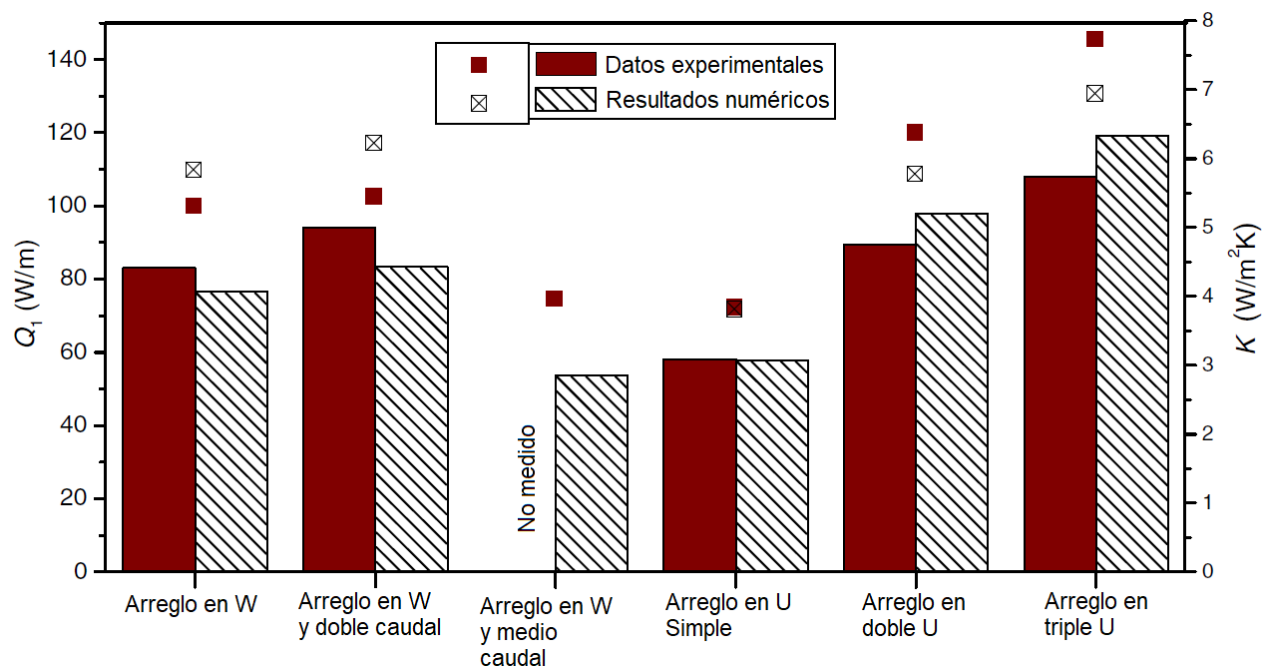


Figura A.8. Resultados numéricos del desempeño de transferencia de calor y su comparación con los resultados experimentales (Gao *et al.*, 2008)

• Ensayo de Respuesta Térmica en pilas de energía, Corea del Sur

Park *et al.* (2015) evaluaron la constructibilidad y el rendimiento térmico de pilas de energía instaladas en Yongin-si, Corea del Sur. Se construyeron dos pilas de energía de 1.35 m de diámetro, desplantadas a 14 m y 12.7 m de profundidad, respectivamente. Los elementos se equiparon con tubería helicoidal para analizar su eficiencia térmica. El perfil estratigráfico estaba conformado por un depósito de arena limosa con gravas de 6 m y capas de roca densa intemperizada.

La constructibilidad de las pilas se determinó con base en el tiempo de construcción y su facilidad de instalación. El paso de la hélice fue diseñado de 20 cm y 50 cm para cada una de las pilas. Posteriormente, se efectuaron los Ensayos de Respuesta Térmica para comparar el rendimiento térmico de las pilas de energía. La eficiencia relativa del intercambio de calor para el paso helicoidal de 20 cm es únicamente de 1.2 veces mayor que la de la pila con paso helicoidal de 50 cm, aunque la tubería con paso helicoidal de 20 cm es 2.4 veces más larga que la de 50 cm. Además, se llevó a cabo una prueba de rendimiento térmico aplicando un ciclo de enfriamiento artificial a las pilas de energía. Dicha prueba indica que la tasa de intercambio de calor no es directamente proporcional a la longitud de la tubería porque la configuración más estrecha del paso helicoidal puede causar interferencia térmica entre los bucles de la tubería.

- **Evaluación de eficiencia térmica en pilas de energía con configuración de tuberías helicoidales y en W respectivamente, Corea del Sur**

Seok Yoon *et al.* (2015) elaboraron pruebas de desempeño térmico (*TPT*, por sus siglas en inglés: (Thermal Performance Test) con la finalidad de evaluar la tasa de intercambio de calor en pilas de energía con diferentes configuraciones para tuberías de conducción (helicoidal y U doble). Además, realizó un análisis de costo-eficiencia para evaluar la eficiencia térmica óptima de cada tipo de intercambiador de calor en función del costo total de construcción. Ambas pilas tienen un diámetro de 40 cm y están desplantadas a 12.8 y 13.27 m, respectivamente. El diámetro de la tubería empleada es de 1.6 y 2.0 cm (interior/exterior). El espaciamiento de los bucles de la tubería helicoidal es igual a 5 cm. Las pilas fueron instrumentadas con sensores de temperatura. El suelo se compone de granito y roca rígida erosionada, el nivel de aguas freáticas se encuentra a 4.5 m de profundidad. En la Figura A.9 se muestra la disposición del sistema de tuberías en las pilas de prueba.

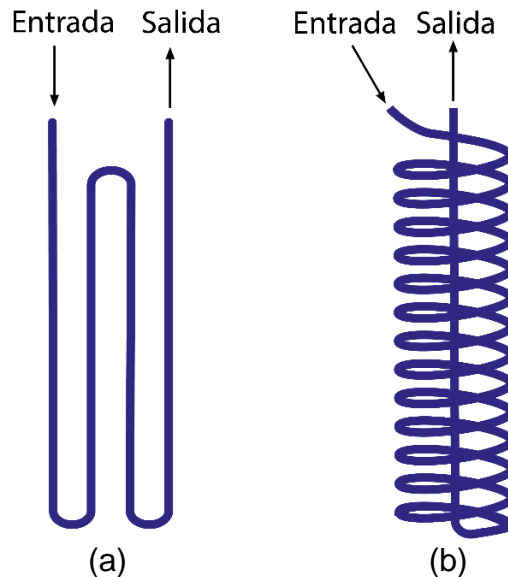


Figura A.9. Configuraciones del circuito primario: (a) pila con tubería en W y (b) pila con tubería helicoidal (adaptado de Seok Yoon *et al.*, 2015)

La prueba de desempeño térmico mide el intercambio de calor entre la pila de energía y el medio que la rodea bajo la condición en que la temperatura de entrada se mantiene constante, para este caso 30°C. La tasa de transferencia de calor (q) se calculó usando la ecuación A.1:

$$q = mc(T_{in} - T_{out})/L \quad (A.1)$$

donde T_{in} es la temperatura del fluido en (K), T_{out} es la temperatura de salida del fluido en (K), m es el caudal, medido en ($kg\ s^{-1}$), c es la capacidad calorífica específica del fluido

en ($J kg^{-1} K^{-1}$) y L es la longitud de la pila en (m). Según los resultados de la prueba TPT de desempeño térmico (Seok Yoon *et al.*, 2015), el intercambio de calor de la pila con tubería helicoidal aumentó aproximadamente 10 a 15% respecto a la pila con tubería en W . Esto se debe a que existe mayor área de contacto entre la tubería y la lechada empleada para la prueba. Por otra parte, la tasa de intercambio de calor disminuyó con el paso del tiempo porque la temperatura del suelo aumentó respecto a la temperatura inicial. Así, se redujo la diferencia de temperatura entre el suelo y el fluido conductor de calor. En la pila con configuración en W la tasa de calor por longitud de tubería fue 350 a 400% mayor que en la tubería helicoidal. Lo anterior probablemente se debe a las pérdidas por fricción y a la interferencia térmica entre los bucles de la tubería. En la Figura A.10 se muestran las gráficas de la tasa de intercambio de calor durante la prueba de desempeño térmico (TPT por sus siglas en inglés) para ambas pilas.

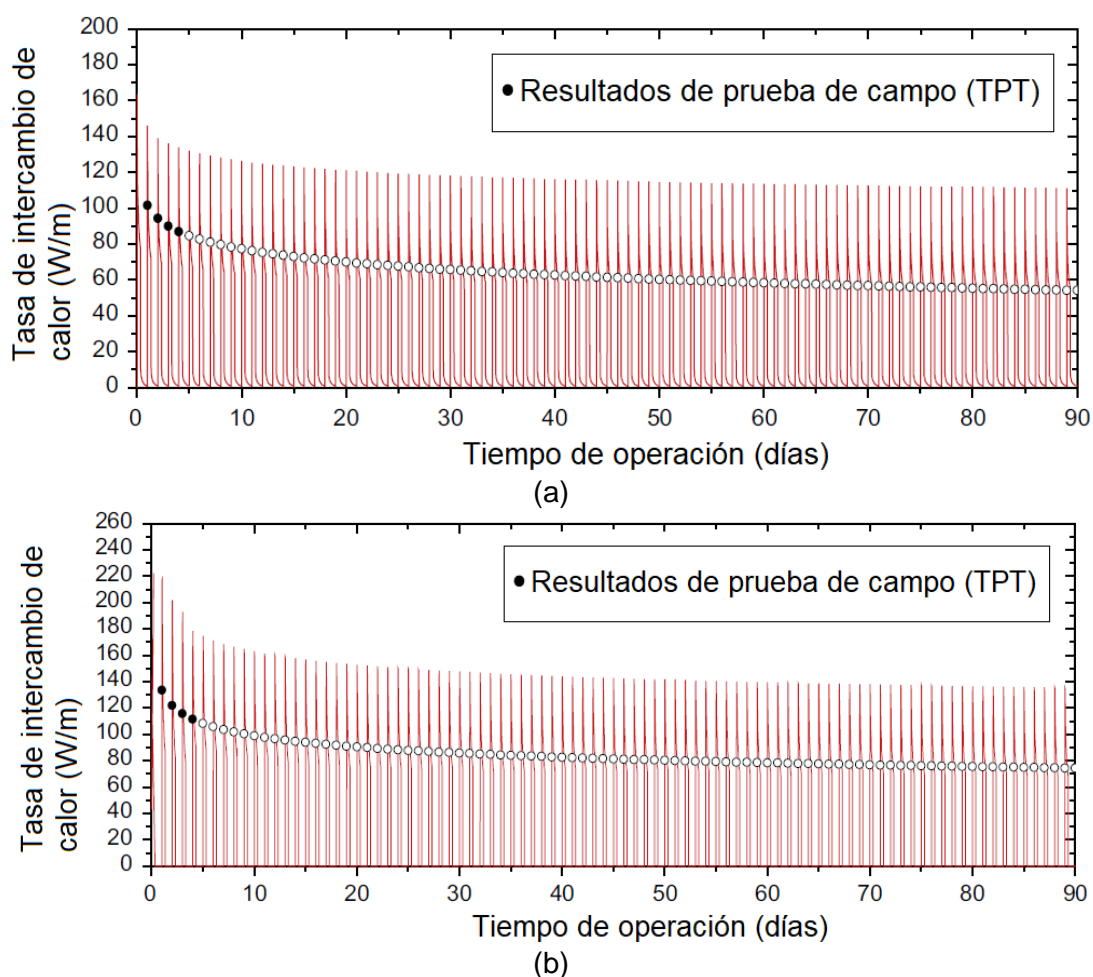


Figura A.10. Resultados de la prueba de desempeño térmico TPT (Thermal Performance Test): (a) Pila con tubería en W ; (b) Pila con tubería helicoidal (adaptado de Seok Yoon *et al.*, 2015)

- **Evaluación de eficiencia térmica en pilas de energía con configuración de tuberías U doble, U triple, W doble y helicoidal, China.**

Lou *et al.* (2016) evaluaron la eficiencia térmica de pilas de energía con distinto arreglo de tuberías, en Shanghai (China). Las configuraciones estudiadas fueron: U doble, U triple, W doble y helicoidal. El análisis de eficiencia térmica se realizó calculando la tasa de intercambio térmico por metro de longitud con la siguiente ecuación:

$$q = W\rho_f c_f(T_{in} - T_{out})/H \quad (\text{A.2})$$

donde q es la tasa de intercambio térmico por metro (W m^{-1}), W es el caudal del fluido intercambiador de calor ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), $\rho_f c_f$ es la capacidad calorífica del fluido portador de calor ($\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$), T_{out} es la temperatura de salida del fluido ($^{\circ}\text{C}$), T_{in} es la temperatura de entrada del fluido ($^{\circ}\text{C}$) y H es la longitud total de las pilas de energía (m).

A partir de los cálculos realizados, se determinó la tasa de intercambio de calor de cada elemento durante la fase de calentamiento y enfriamiento (Figura A.11). En la etapa de enfriamiento, la pila con tubería en U doble tiene la eficiencia térmica más baja. Por otra parte, las pilas con tubería helicoidal y en W doble presentan resultados similares. Sin embargo, la eficiencia del elemento con configuración en W doble fue inestable. Lo anterior puede generarse por la conexión en serie de los cuatro tubos en forma de U. Dicha conexión hace que el fluido circule hacia arriba y abajo varias veces y la temperatura del fluido es afectada por la temperatura de la superficie del suelo, que cambia drásticamente durante el día (Luo *et al.*, 2014). En la etapa de calentamiento se obtuvieron resultados similares a la de enfriamiento. La tubería en U doble tiene la eficiencia térmica más baja y la tubería en U triple tiene la más alta. Las pilas con tubería en W doble y helicoidal tienen diferente desempeño al principio de la prueba y después de 40 horas de operación se igualan.

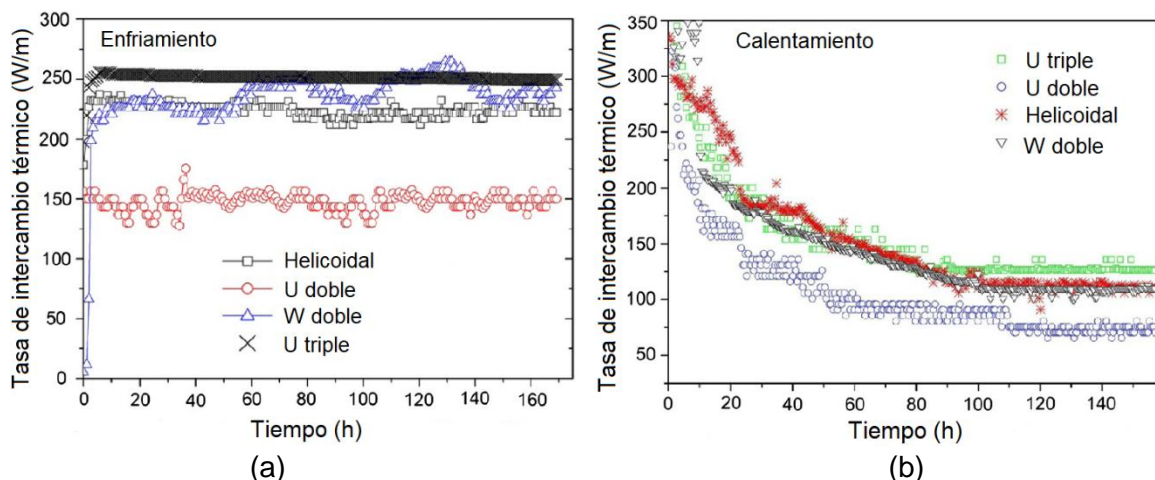


Figura A.11. Tasa de intercambio térmico específica para los cuatro tipos diferentes de intercambiadores de calor, todos con un diámetro de tubería de 25 mm: (a) Simulación de refrigeración de un edificio y (b) Simulación de calefacción de un edificio (Luo *et al.*, 2014)