



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Evaluación de propuestas de mejora  
a la metodología de la ASHRAE para  
el diseño de sistemas de bombas de  
calor geotérmico**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Luis Manuel García Rivera

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Norma Patricia López Acosta



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

“Amenizar la enseñanza con la hermosa palabra,  
con la anécdota oportuna y la relación  
de cada conocimiento con la vida.”

Gabriela Mistral

## RESUMEN

Las Bombas de Calor Geotérmico (BCG) surgen como una alternativa para reducir las emisiones de carbono generadas por los sistemas convencionales para el acondicionamiento de espacios. Estos elementos permiten transferir el calor del suelo a una edificación o viceversa, a través de un sistema cíclico. A pesar de sus múltiples ventajas, la implementación de los sistemas a base de BCG se ha visto restringida debido a sus altos costos iniciales y la falta de especificaciones a nivel internacional para su diseño. Así, la sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) propuso una metodología para calcular la longitud requerida para satisfacer la demanda de energía de la edificación. Para implementar el método de la ASHRAE es necesario considerar la temperatura de penalización ( $T_p$ ), la cual representa la penalización a largo plazo de la temperatura del suelo causada por desequilibrios en la transferencia de calor del/al suelo. Algunos autores han analizado la temperatura de penalización y su comportamiento a largo plazo con distintos modelos analíticos. Se ha demostrado que la temperatura de penalización ( $T_p$ ) determinada con el método de la ASHRAE subestima los valores reales más del 50%.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis es comparar las propuestas de mejora de diversos autores para el cálculo de la temperatura de penalización ( $T_p$ ) a la ecuación fundamental de la ASHRAE, así como la longitud requerida para satisfacer la demanda energética.

En la parte principal de este trabajo, se explican los conceptos básicos sobre la energía geotérmica, el funcionamiento de las bombas de calor geotérmico y sus componentes principales. Asimismo, se presentan algunos ejemplos de su uso a nivel nacional e internacional. Posteriormente, se describe la metodología de la ASHRAE, su ecuación fundamental y se presentan las propuestas de mejora de diversos autores para la evaluación de la penalización térmica. Enseguida, se evalúa la interacción entre pozos intercambiadores de calor con diferentes configuraciones geométricas y la longitud total requerida con cada propuesta de mejora a la metodología de la ASHRAE. Para ello, se utilizó la información del primer sistema a base de pilas de energía construido en México. Se trata del Proyecto C73, una edificación de vanguardia ubicada en el poniente de la Ciudad de México, y que al día de hoy, ha sido acreedora a varios premios a niveles nacional e internacional, entre ellos Premio *Best of the Best* en la categoría de Arquitectura entregado por ICONIC AWARDS del Consejo Alemán de Diseño (2022).

Finalmente, se dan conclusiones de los análisis efectuados y con base en la información recopilada se presentan recomendaciones para el diseño de los sistemas intercambiadores de calor.

## ABSTRACT

Geothermal Heat Pumps (GHPs) emerge as an alternative to reduce carbon emissions generated by conventional systems for space conditioning. These elements allow heat to be transferred from the ground to a building or vice versa, through a cyclical system. Despite their many advantages, the implementation of GHP systems has been restricted due to their high initial costs and the lack of international specifications for their design. Thus, the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) developed a methodology to calculate the length required to meet the building's energy demand. To implement the ASHRAE method it is necessary to consider the temperature penalty ( $T_p$ ), which represents the long-term penalty of soil temperature caused by imbalances in heat transfer from/to the soil. Some authors have analyzed the penalty temperature and its long-term behavior with different analytical models. It has been shown that the penalty temperature ( $T_p$ ) determined with the ASHRAE method underestimates the actual values by more than 50%.

In this context, the main objective of this thesis is to compare the improvement proposals of various authors for the calculation of the penalty temperature ( $T_p$ ) to the fundamental equation of ASHRAE, as well as the length required to satisfy the energy demand.

In the main part of this work, the basic concepts of geothermal energy, the operation of geothermal heat pumps and their main components are explained. Likewise, some examples of its use at national and international level are presented. Subsequently, the ASHRAE methodology is described, its fundamental formula and the improvement proposals of various authors for the evaluation of thermal penalty are presented. Next, the interaction between heat exchanger wells with different geometric configurations and the total length required with each improvement proposal to the ASHRAE methodology is evaluated. For this, the information of the first system based on energy piles built in Mexico was obtained.

Finally, conclusions of the complete analyzes are given and based on the information collected, recommendations are presented for the design of the heat exchanger systems.

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por darme la oportunidad de formarme académicamente en la Ingeniería Civil, por brindarme una educación de calidad y por todas las experiencias vividas durante todo este tiempo a nivel nacional e internacional en la **Pontificia Universidad Católica de Chile**.

Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** por darme la oportunidad de iniciarme en la investigación, formar parte de sus becarios y por el apoyo económico recibido para la culminación de este trabajo.

A la **Dra. Norma Patricia López Acosta** por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación, por la confianza depositada en mí a pesar de mis deficiencias en el tema y por todo el apoyo recibido para lograr cumplir esta importante meta.

Al **M.I. David F. Barba Galdámez** por su apoyo, su enorme paciencia, por compartir su invaluable conocimiento y por el tiempo invertido en la realización este proyecto.

A los sinodales **M.I. Nikté Ocampo Guerrero, Dr. Enrique Ibarra Razo, M.I. Walter Paniagua Zavala** y **M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose** por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, por aceptar formar parte en la culminación de esta meta y por compartirme su enorme conocimiento en las aulas de la Facultad de Ingeniería.

A mis padres, **Argelia Rivera Magallón** y **Juan Manuel García Atayde**, por todo el apoyo incondicional recibido durante toda mi vida para cumplir mis metas, ser grandes ejemplos de vida y su enorme cariño en cada momento de mi formación académica.

A **Marco Cabrera, Leonardo Velasco, Fernando Ramírez, Fernando Sanabria, Crhistian Coronado** y **Andrés Guzmán** por su amistad, horas de estudio, motivación y por todos estos años que pasamos juntos en la Facultad de Ingeniería.

A los amigos y compañeros que conocí en las aulas de la Facultad de Ingeniería, con los que compartí las aulas virtuales durante la pandemia y a las personas que me han apoyado de manera desinteresada.

A todos los profesores, investigadores y profesionistas con los que me he relacionado a lo largo de mi vida, sin su dedicación y su conocimiento no hubiera sido posible llegar hasta este momento.



## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
2.1 Calor interno de la Tierra y variación de temperatura en el suelo .....	5
2.1.1 Calor interno de la Tierra .....	5
2.1.1 Variación de temperatura en el suelo.....	6
2.2 Bombas de calor geotérmico (BCG) .....	7
2.2.1 Componentes de las Bombas de Calor Geotérmico.....	8
2.2.2 Aspectos teóricos del funcionamiento de una bomba de calor.....	9
2.2.3 Principios de operación de las bombas de calor geotérmico.....	11
2.2.4 Beneficios y limitaciones .....	11
2.2.5 Pozos intercambiadores de calor y estructuras termoactivas .....	13
2.2.6 Usos a nivel mundial y experiencias en México .....	14
2.3 Transferencia de calor en suelos.....	15
2.3.1 Mecanismos de transferencia de calor en suelos .....	15
2.3.2 Propiedades térmicas de los suelos .....	17
2.4 Fundamentos para el análisis de transferencia de calor en pozos intercambiadores de calor y pilas de energía .....	19
2.4.1 Escala de análisis .....	19
2.4.2 Consideraciones generales.....	20
2.4.3 Formalización del problema .....	21
2.4.4 Teorema de Duhamel (principio de superposición).....	22
2.5 Soluciones analíticas para la transferencia de calor en pozos intercambiadores de calor y pilas de energía.....	24
2.5.1 Generalidades.....	24
2.5.2 Cálculo de la resistencia térmica de la perforación .....	24

2.5.3	Modelos para el análisis de transferencia de calor fuera de la perforación .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA DE LA ASHRAE PARA EL DISEÑO TÉRMICO DE POZOS INTERCAMBIADORES DE CALOR Y PILAS DE ENERGÍA.....</b>	<b>31</b>
3.1	Clasificación de las metodologías de diseño térmico.....	31
3.1.1	Soluciones directas e iterativas .....	31
3.2	Metodología de la ASHRAE .....	33
3.2.1	Bases teóricas del método .....	33
3.2.2	Ecuación fundamental de diseño de la ASHRAE .....	33
3.2.3	Derivación de ecuación fundamental de diseño de la ASHRAE .....	35
3.3	Propuestas de mejora al método de la ASHRAE .....	36
3.3.1	Determinación de resistencia térmica efectiva de los suelos utilizando funciones $g$ .....	36
3.3.2	Evaluación de la penalización térmica .....	37
<b>4</b>	<b>EVALUACIÓN DE PROPUESTAS PARA MEJORAR LA METODOLOGÍA DE LA ASHRAE.....</b>	<b>57</b>
4.1	Consideraciones generales.....	57
4.1.1	Localización del sitio de estudio.....	57
4.1.2	Geología.....	58
4.1.3	Estratigrafía del sitio.....	58
4.1.4	Estudios de las propiedades térmicas del sitio .....	59
4.2	Cargas térmicas .....	60
4.3	Parámetros iniciales .....	62
4.4	Presentación y análisis de resultados.....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>73</b>
5.1	Conclusiones.....	73
5.2	Recomendaciones .....	75
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO I. PROPUESTAS PARA LAS CONFIGURACIONES DE LOS POZOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....</b>	<b>81</b>
I 1.	Propuesta 1 para la configuración de los pozos intercambiadores de calor .....	81
I 2.	Propuesta 2 para la configuración de los pozos intercambiadores de calor .....	82
	<b>ANEXO II. CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA SIMULAR EL MÉTODO DE FOSA (2011) .....</b>	<b>85</b>

**ANEXO III. CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA SIMULAR EL MÉTODO DE  
AHMADFARD Y BERNIER (2018) (Barba, 2023) .....89**

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. La corteza, manto y núcleo de la Tierra (Dickson et al., 2004).....	6
Figura 2.2. La estructura interna y la temperatura de la Tierra (Boehler, 1996).....	7
Figura 2.3. Tipos de Bombas de Calor Geotérmico (U.S. Department of Energy, 2011) .....	8
Figura 2.4. Componentes de las Bombas de Calor Geotérmico (Pedersen, 2018) .....	9
Figura 2.5. Circuito cerrado de una bomba de calor (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2022) .....	10
Figura 2.6. Ciclo termodinámico de una bomba de calor (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2022) .....	10
Figura 2.7. Esquema del funcionamiento de una Bomba de Calor Geotérmico (ATECYR, 2012)	12
Figura 2.8. Aplicación típica de un sistema de pozo intercambiador de calor (Rybach, 2001).....	14
Figura 2.9. Suelo radiante (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2014).....	14
Figura 2.10. Ejemplo de los mecanismos de transferencia de calor (Peter y Hinrichs, 2012).....	17
Figura 2.10. Escalas de tiempo y espacio involucradas en el proceso térmico de pozos Intercambiadores de Calor Geotérmico (Li <i>et al.</i> , 2014). .....	20
Figura 2.11. Definiciones de las variables de la ecuación 2.13 y la carga variable $q(t)$ de los intercambiadores de calor del suelo (Li <i>et al.</i> , 2014).....	23
Figura 2.12 $\Delta$ red de resistencias para un pozo con una sola tubería en U (Javed y Spitler, 2016).	25
Figura 2.13. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Lineal Infinita (ILS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013) .....	28
Figura 2.14. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Cilíndrica Infinita (ICS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013).....	29
Figura 2.15. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Lineal Finita (FLS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013) .....	29
Figura 2.16. Parámetros geométricos utilizados para representar una fuente de línea finita y su imagen espejo (Spitler y Bernier, 2016).....	30
Figura 3.1 Planta del caso de estudio (Capozza <i>et al.</i> , 2012).....	42
Figura 3.2 Energía requerida por la edificación (Capozza <i>et al.</i> , 2012) .....	42
Figura 3.3 Perturbación térmica promedio (Capozza <i>et al.</i> , 2012) .....	43
Figura 3.4 Perturbación térmica promedio en los BHE (Capozza <i>et al.</i> , 2012).....	43

Figura 3.5 Perturbación térmica promedio en los BHE del modelo aproximado (Capozza *et al.*, 2012).....44

Figura 3.6 Modelo para el cálculo de  **$T_{p8}$**  con un BHE central (Fossa y Rolando, 2015).....45

Figura 3.7 Longitud total ( $L$ ) calculada según el modelo  $T_p$  y el  $T_{p8}$  (Fossa y Rolando, 2015) .....47

Figura 3.8 Procedimiento de los cinco pasos para el método iterativo (Bernier y Ahmadfard, 2018)  
49

Figura 3.9 Esquema de la interacción térmica de todos los segmentos de pozos hacia el segmento #1 (Bernier y Ahmadfard, 2018) .....50

Figura 3.10 Perfil de Carga del suelo (Bernier y Ahmadfard, 2018) .....53

Figura 4.1 Zonificación de la CDMX y ubicación del proyecto (UNAM, 2015) .....58

Figura 4.2 Perfil estratigráfico del sitio (López *et al.*, 2022) .....59

Figura 4.3 Equipo TRT- IIUNAM (López *et al.*, 2022) .....60

Figura 4.4 Temperatura ambiente del sitio de estudio (López *et al.*, 2022).....61

Figura 4.5 Cargas térmicas del proyecto (López *et al.*, 2022) .....61

Figura 4.6 Diseño del pozo intercambiador de calor .....63

Figura 4.8 Temperatura de penalización ( **$T_p$** ) calculada con el método de Capozza y el método de Fossa.....67

Figura 4.9 Temperatura de penalización ( **$T_p$** ) calculada con el método de Philippe & Bernier y el método de Fossa .....67

Figura 4.10 Temperatura de penalización ( **$T_p$** ) calculada con el método de Fossa & Rolando y el método de Fossa .....68

Figura 4.11 Longitud total calculada con el método de la ASHRAE y el método de Fossa .....69

Figura 4.12 Longitud total calculada con el método de Capozza y el método de Fossa.....70

Figura 4.13 Longitud total calculada con el método de Philippe & Bernier y el método de Fossa.70

Figura 4.14 Longitud total calculada con el método de Bernier & Amadfard y el método de Fossa  
71

Figura 4.15 Longitud total calculada con el método de Fossa & Rolando y el método de Fossa....72

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1. Probabilidad y gravedad del impacto ambiental potencial de los proyectos geotérmicos de uso directo (Dickson <i>et al.</i> , 2003) .....	13
Tabla 2.2. Conductividad térmica, densidad y calor específico de los componentes más comunes del suelo a 10°C (Ochsner, 2017) .....	18
Tabla 2.3. Suposiciones para considerar al derivar una solución analítica (Li <i>et al.</i> , 2014).....	21
Tabla 3.1. Resumen de las metodologías de diseño (Spilter, 2016).....	34
Tabla 3.2. Coeficientes <b>bi</b> y <b>ci</b> para la correlación <i>F</i> (Philippe <i>et al.</i> , 2010) .....	39
Tabla 3.3 Características de la planta (Capozza <i>et al.</i> , 2012) .....	41
Tabla 3.4 Configuraciones de BHE (Fossa y Rolando, 2015) .....	46
Tabla 3.5 Constantes a emplear en la ecuación. 3.23 para las configuraciones R y no R (Fossa y Rolando, 2015).....	47
Tabla 3.6 Cargas máximas y medias mensuales del suelo en refrigeración y calefacción (Bernier y Ahmadfard, 2018) .....	52
Tabla 3.7 Carga anual, mensual y horaria utilizada para el método de los tres pulsos (Bernier y Ahmadfard, 2018) .....	53
Tabla 3.8 Parámetros del pozo y propiedades térmicas del suelo (Bernier y Ahmadfard, 2018) ....	54
Tabla 3.9 Comparación entre el método propuesto y otras cuatro herramientas de dimensionamiento (Bernier y Ahmadfard, 2018) .....	55
Tabla 4.1 Resultados de la prueba TRT (López <i>et al.</i> , 2022) .....	60
Tabla 4.2 Parámetros iniciales .....	62
Tabla 4.3 Temperaturas de penalización para las configuraciones con 6 pozos.....	64
Tabla 4.4 Temperaturas de penalización para las configuraciones con 12 pozos.....	64
Tabla 4.5 Longitud total para las configuraciones con 6 pozos .....	65
Tabla 4.6 Longitud total para las configuraciones con 12 pozos .....	65

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la Tierra ha registrado un aumento de temperatura de aproximadamente 1.2 °C (Couttolenc, 2021). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022), los últimos seis años fueron los más cálidos que se tienen registrados desde 1880 y se estima que para 2024 el aumento de temperaturas supere los 1.5 °C. Derivado de este aumento de temperatura, el uso de sistemas de climatización en lugares cerrados ha ganado popularidad en todo el mundo. El sistema de climatización más popular funciona con energía eléctrica, por lo que el consumo de energía también ha incrementado en todo el mundo. Por cada grado de temperatura que baja el aire acondicionado, se gasta un 8% más de electricidad (Fundación Eroski, 2012).

En México, el 45% de las viviendas particulares en localidades urbanas utilizan algún sistema de climatización, se contemplan más de 7 millones de equipos de aire acondicionado y a nivel nacional el 6.3% de las viviendas en el país usan algún tipo de equipo de climatización (INEGI, 2018). Según la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares del 2018 en el norte del país el 48.1% de las viviendas cuenta con aire acondicionado, el 1.3% en el centro del país y en el sur el 12.4%. Los usuarios de este tipo de sistema de climatización reportaron que en promedio lo usan entre 5 y 9 horas por día, por lo que el consumo de energía en esas viviendas aumenta drásticamente.

Por otra parte, debido al incremento demográfico se han propuesto modelos de expansión vertical de las urbes y la construcción de departamentos de un nivel. Durante el 2015, en México se presentó el mayor número de unidades de viviendas construidas con casi 302,000 nuevos hogares, mientras

que en el 2020 se construyeron solo 151,000 (Statista, 2023). De acuerdo con la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) se estima que, de todo el consumo energético nacional, el 40% se utiliza en edificios habitacionales, privados y públicos. La Secretaría de Energía (SENER) reportó que, en 2018 el 83% de la energía producida se obtuvo de los hidrocarburos. Lo anterior implica un gran impacto ambiental, ya que esta energía es necesaria para el funcionamiento de los sistemas de climatización de espacios y la búsqueda de alternativas para abastecer dicha demanda se ha visto limitada (SENER, 2018). Una de las propuestas para enfrentar este problema es el uso de estructuras termoactivas, las cuales consisten en elementos de cimentación equipados con un sistema cerrado de tuberías que les permite transportar energía térmica del/al suelo (López y Barba, 2022). No obstante, su principal limitación es el alto costo inicial que implica todo el proyecto (Lund *et al.*, 2011).

Para poder diseñar las estructuras termoactivas es necesario conocer la carga térmica que la edificación requiere y la cantidad de energía que el sistema puede intercambiar con el suelo para poder satisfacer total o parcialmente los requerimientos de la edificación (López y Barba, 2022). A nivel mundial, para el diseño de estas estructuras se utiliza la metodología de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) la cual se ha actualizado constantemente gracias a diversas investigaciones en este tema. Sin embargo, el diseño final de las estructuras termoactivas necesita estudios analíticos para determinar los cambios de temperatura, lo cual complica el análisis porque se deben considerar diversas escalas de espacio y tiempo.

La ASHRAE tiene una guía para el diseño de bombas de calor geotérmico elaborada por Kavanaugh y Rafferty (2014), en donde se presenta la ecuación fundamental para obtener la longitud necesaria del pozo intercambiador de calor de tal manera que se pueda satisfacer la carga térmica planeada. En esta ecuación, la variable más importante es la temperatura de penalización ( $T_p$ ). Este valor representa la penalización a largo plazo de la temperatura del suelo causada por desequilibrios en la transferencia de calor del suelo (Kavanaugh y Rafferty, 2014). En los últimos años, han surgido diversas investigaciones para evaluar el parámetro ( $T_p$ ) y evaluar diversos procedimientos de cálculo con el fin de optimizar los procesos y cambiar los modelos convencionales.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar las propuestas de mejora a la metodología de la ASHRAE para el diseño de sistemas de bombas de calor geotérmico, utilizando datos del primer proyecto de pilas de energía en México. En este sentido, el presente trabajo pretende identificar la propuesta más adecuada para los distintos casos de análisis, y de esta forma obtener una longitud óptima para los intercambiadores de calor.

Esta tesis consta de cinco capítulos, incluyendo la introducción como Capítulo 1. En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de la bomba de calor geotérmico y los fundamentos necesarios para realizar en análisis de la transferencia de calor entre los pozos

intercambiadores de calor. Adicionalmente, se detallan las ventajas y limitaciones de estos sistemas, y se presentan algunos ejemplos de su uso en México.

En el Capítulo 3 se detalla la metodología de la ASHRAE, sus bases teóricas y su ecuación fundamental de diseño. Asimismo, se presenta cada propuesta de mejora al método de la ASHRAE y los escenarios donde los autores aplican dicha mejora para la obtención de la temperatura de penalización ( $T_p$ ).

En el Capítulo 4 se implementan las propuestas de mejora a la metodología de la ASHRAE para determinar la longitud total requerida por un sistema a base de pilas de energía ubicado en la Ciudad de México. Al inicio del capítulo se define la geología y estratigrafía del sitio, así como las cargas y propiedades térmicas del suelo. Posteriormente, se proponen distintas configuraciones para los pozos intercambiadores de calor y se calcula la temperatura de penalización y longitud total requerida total. Al final del Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, así como un análisis comparativo entre la temperatura de penalización ( $T_p$ ) obtenida con cada propuesta de mejora y con el método de Fossa (2011).

Finalmente, en el Capítulo 5 se dan conclusiones generales y recomendaciones derivadas de este trabajo de investigación.



## **2 ANTECEDENTES**

### **2.1 Calor interno de la Tierra y variación de temperatura en el suelo**

#### **2.1.1 Calor interno de la Tierra**

Desde tiempos antiguos existe la hipótesis sobre la presencia de altas temperaturas en el interior de la Tierra. Esta hipótesis se basa en observaciones de la superficie terrestre ya que en ella se pueden apreciar volcanes, fuentes termales y otros fenómenos que sirven como evidencia de que la temperatura de la Tierra se incrementa con la profundidad (Prol, 1995).

La estructura interna de la Tierra se divide en tres partes principales (Figura 2.1): corteza, manto y núcleo (subdividido en interno y externo). La temperatura y la densidad del suelo se incrementan con la profundidad (Arellano *et al.*,2014).

La corteza es una capa rocosa, de espesor variable, que incluye a los continentes y océanos: el manto se comporta como un sólido cuando se trata de transmitir ondas sísmicas y como líquido viscoso bajo la influencia de altas temperaturas. El núcleo es la parte más profunda y caliente de la Tierra, está formado por metales pesados.

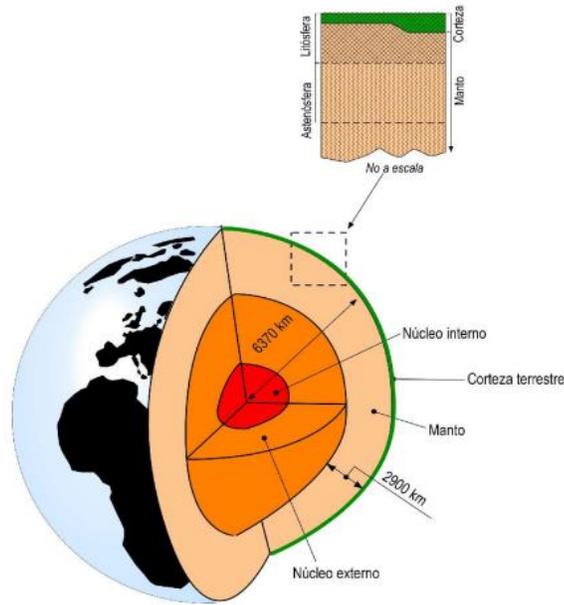


Figura 2.1. La corteza, manto y núcleo de la Tierra (Dickson y Fanelli, 2004)

El transporte de calor en el interior de la Tierra se puede llevar a cabo mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La conducción transporta el calor de un cuerpo caliente a uno más frío por medio del contacto; la convección se presenta únicamente en fluidos y es un proceso más complejo; la radiación es una forma de transporte de calor a altas temperaturas (Prol, 1995).

El calor es un tipo de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que se transmite a través de cuerpos de roca caliente por conducción y convección. La energía geotérmica es un recurso limpio y renovable que hoy en día proporciona calor a varias ciudades en todo el mundo. Se estima que el calor que fluye en el interior de la Tierra equivale a 42 millones de MW de potencia, un MW equivale 1 millón de vatios y puede satisfacer la demanda energética de 1,000 personas (Kagel *et al.*, 2005).

### 2.1.1 Variación de temperatura en el suelo

Se conoce como gradiente geotérmico a la cantidad de temperatura de la Tierra que aumenta con la profundidad, es decir, indica el calor que circula desde el interior de la Tierra hacia la superficie. La temperatura aumenta 25°C por cada kilómetro de profundidad. Así, el centro de la Tierra alcanza temperaturas superiores a los 5000 °C (Alfè *et al.*, 2002). Esta diferencia de temperaturas impulsa el flujo de energía geotérmica y permite que se utilice para satisfacer ciertas necesidades humanas.

El calentamiento geotérmico proviene de la descomposición de elementos radioactivos que se encuentran en la litosfera y en el manto del planeta. Se dice que esta forma de calentamiento representa el 50% del calor de la Tierra y el resto proviene del calor de la formación de la Tierra que ha quedado atrapado en el planeta (Hanania *et al.*, 2019).

La Figura 2.2 muestra como disminuye la temperatura a medida que se acerca a la superficie de la corteza terrestre. En general, los cambios de temperatura son graduales, excepto en la base del manto y la litosfera debido a la presencia de fluidos.

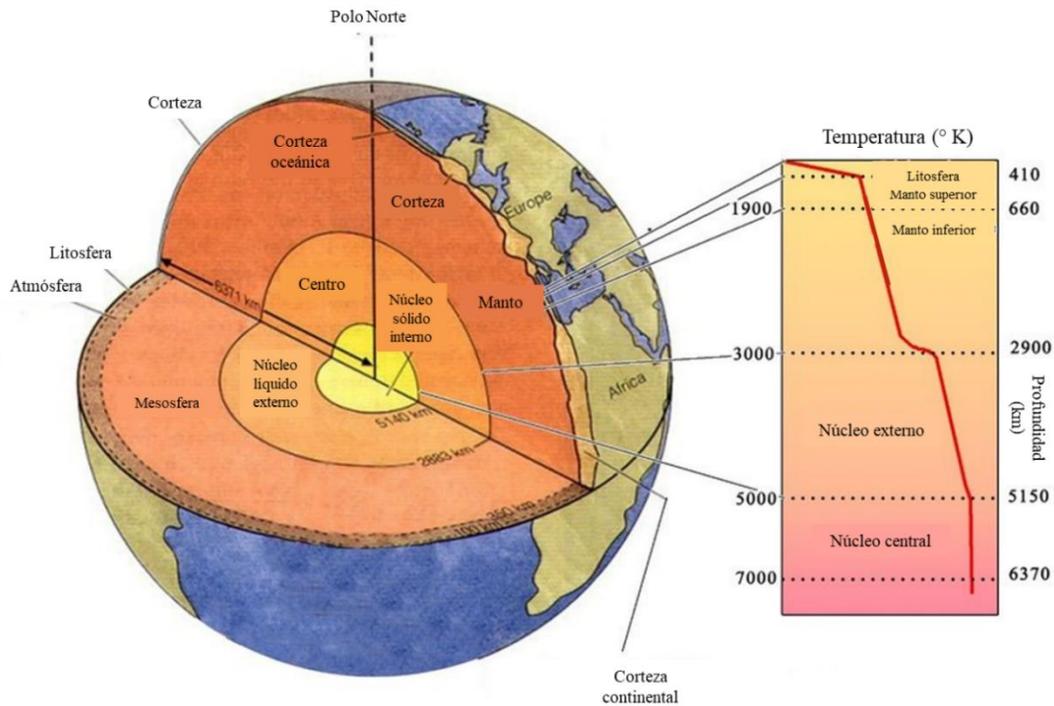


Figura 2.2. La estructura interna y la temperatura de la Tierra (Boehler, 1996)

## 2.2 Bombas de calor geotérmico (BCG)

Las Bombas de Calor Geotérmico (BCG) son máquinas térmicas que sirven para proporcionar calefacción o enfriamiento a un espacio determinado usando como fuente de calor el subsuelo (García *et al.*, 2012). En verano, las BCG extraen calor de un edificio y lo transfieren al suelo para su refrigeración, mientras que en invierno toman el calor del subsuelo para transferirlo al edificio.

Las Bombas de Calor Geotérmico son una solución para proporcionar calefacción en ciudades con altos índices de contaminación atmosférica ya que no generan emisiones de efecto invernadero (U.S. Department of Energy, 2011). En general, todos los tipos de suelo son aptos para el aprovechamiento de esta energía con ayuda de las BCG. Sin embargo, el tipo de instalación a utilizar dependerá de las características geotécnicas y geológicas de la zona.

Existen dos tipos de instalación: el sistema abierto y el sistema cerrado. El sistema abierto utiliza el agua de un cuerpo superficial o subterráneo y la hace circular por tuberías de intercambio de calor hasta la BCG para luego ser devuelta al mismo cuerpo de agua. Por otra parte, el sistema cerrado

hace circular un fluido a través de un circuito de tuberías hasta la bomba de calor para luego seguir circulando por estas mismas. El sistema de circuito cerrado se puede dividir en tres tipos (Figura 2.3): horizontal, vertical y estanque. El sistema horizontal es rentable en construcciones residenciales nuevas; el vertical se usa para edificios comerciales donde el terreno es limitado y el estanque se recomienda cuando el sitio tiene un cuerpo de agua (U.S. Department of Energy, 2011).

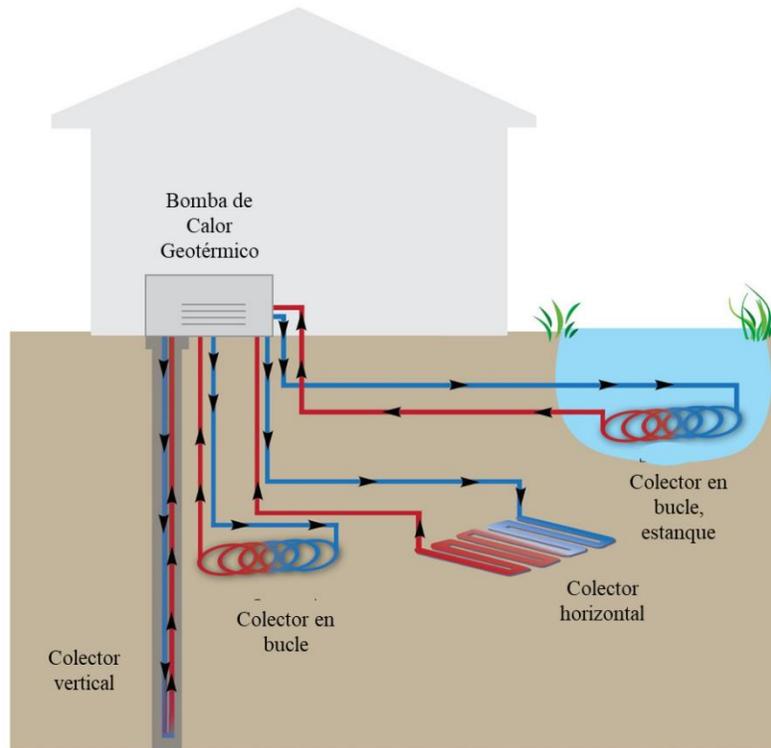


Figura 2.3. Tipos de Bombas de Calor Geotérmico (U.S. Department of Energy, 2011)

### 2.2.1 Componentes de las Bombas de Calor Geotérmico

Las Bombas de Calor Geotérmico requieren tres componentes principales: el circuito primario, el circuito secundario y la bomba de calor. El circuito primario es un sistema cerrado de tuberías por el que circula el fluido conductor de calor; el circuito secundario consiste en una red cerrada de tuberías de calefacción colocada en los pisos de la edificación y la bomba de calor se encarga de conectar ambos circuitos para lograr el ajuste de la temperatura (López *et al.*, 2018). La Figura 2.4 muestra los tres componentes de las BCG (Pedersen, 2018).

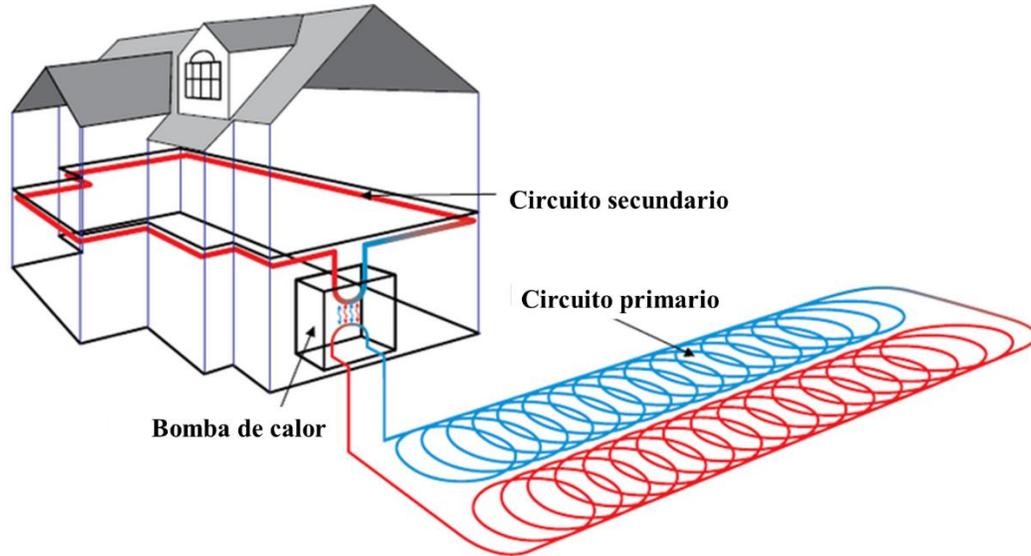


Figura 2.4. Componentes de las Bombas de Calor Geotérmico (Pedersen, 2018)

### 2.2.2 Aspectos teóricos del funcionamiento de una bomba de calor

El funcionamiento de una bomba de calor se basa en la termodinámica. Su operación consiste en transportar energía en forma de calor de un ambiente a otro, lo cual permite utilizarlas para la climatización de espacios. La principal ventaja del uso de la bomba de calor es el ahorro de energía ya que puede llegar al 70% respecto al sistema de calefacción tradicional (Españeira, 2022).

La bomba de calor funciona con el aprovechamiento de la energía que producen los cambios de estado del fluido refrigerante. La Figura 2.5 muestra un circuito cerrado que forma parte de una bomba de calor. Este circuito consta de un compresor (reduce el volumen del gas), un condensador para que el fluido ceda energía al agua del depósito, una válvula de expansión para reducir la presión del fluido y un evaporador para permitir el intercambio entre el fluido refrigerante y el aire exterior.

La Figura 2.6 representa un ciclo termodinámico de las BCG, el cual se puede resumir en cuatro pasos:

- I. El fluido refrigerante se encuentra a baja presión y en estado líquido. El aire aspirado pasa a través de un evaporador donde el fluido absorbe su temperatura y cambia de estado.
- II. El fluido llega en forma de vapor, pero todavía con baja presión. Con ayuda de un compresor se produce un aumento de la presión con el consiguiente aumento de temperatura.
- III. Se obtiene un vapor proveniente del calor del aire en el evaporador más el calor proveniente de la transformación de la energía eléctrica en energía calorífica. Este vapor es el que circula por el condensador situado a lo largo del caldero donde va creciendo la energía acumulada, volviendo a un estado líquido.

IV. El fluido refrigerante en estado líquido se hace pasar por una válvula de expansión para obtener de nuevo el fluido en sus condiciones iniciales (con baja presión y temperatura).

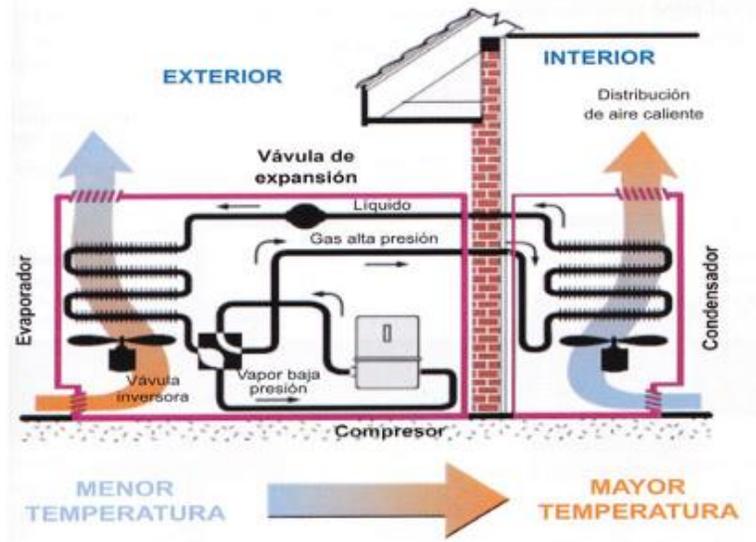


Figura 2.5. Circuito cerrado de una bomba de calor (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2022)

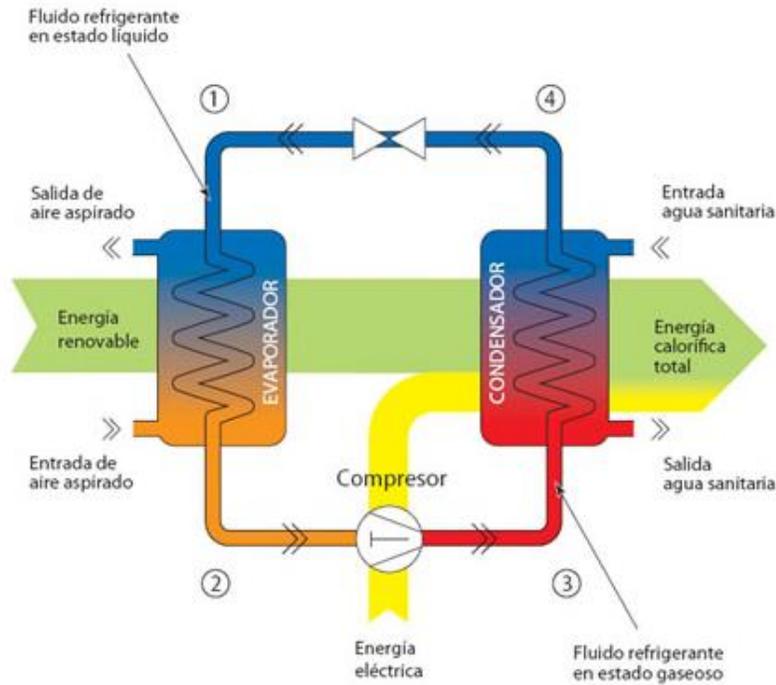


Figura 2.6. Ciclo termodinámico de una bomba de calor (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización, 2022)

La eficiencia de una bomba de calor se mide por medio de su coeficiente de rendimiento (COP). La ecuación 2.1 es la expresión para calcular el coeficiente de rendimiento, que se define como el cociente entre la potencia de calefacción ( $Q$ ) y la potencia eléctrica absorbida ( $W$ ).

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

Para una correcta eficiencia y funcionalidad, una bomba de calor debe alcanzar un COP que varía entre 2 y 6. El COP depende del tipo de bomba de calor y las condiciones de su funcionamiento. La variable que más influye en su funcionamiento es la temperatura ambiente. No obstante, también influye la temperatura de entrada, la temperatura de preparación y la humedad relativa (Tong *et al.*, 2010).

### 2.2.3 Principios de operación de las bombas de calor geotérmico

A diferencia de la energía solar, eólica o marina, la energía geotérmica no tiene su origen en la radiación solar ya que su fuente principal es el calor existente en el interior de la Tierra y su objetivo es aprovechar este recurso. Las Bomba de Calor Geotérmico permiten extraer/inyectar la energía térmica del suelo. Su funcionamiento es similar al de las bombas de calor presentes en los equipos de aire acondicionado. Dichos equipos consisten en un compresor y un evaporador que realizan el cambio de presiones para trasladar la temperatura desde el subsuelo hasta los sistemas de reparto de las edificaciones. Cuando se obtiene la temperatura deseada, se distribuye por los espacios seleccionados para climatizar (Peña, 2021).

En el interior de la Tierra, aproximadamente a los 20 metros de profundidad, la temperatura se mantiene constante durante todo el año (entre 18 y 24 °C) y se considera óptima tanto en verano como en invierno. El empleo de la bomba de calor consiste en tratar la temperatura existente para obtener la temperatura deseada (ATECYR, 2012). Por lo tanto, los sistemas geotérmicos, con el modelo de bomba adecuado, pueden ser utilizados para la refrigeración de espacios en meses cálidos y para calefacción en invierno (Figura 2.7).

### 2.2.4 Beneficios y limitaciones

El principal beneficio de las BCG es que utilizan entre 25 y 50% menos de electricidad que los sistemas tradicionales para la climatización de espacios. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establece que las BCG ayudan a reducir el consumo de energía, y sus emisiones correspondientes, en un 44% en comparación con las bombas de calor de fuente de aire y hasta un 72% en comparación con la calefacción estándar (GreenMatch, 2021). Las Bombas de Calor Geotérmico también controlan la humedad al mantener alrededor del 50% de la humedad interior.

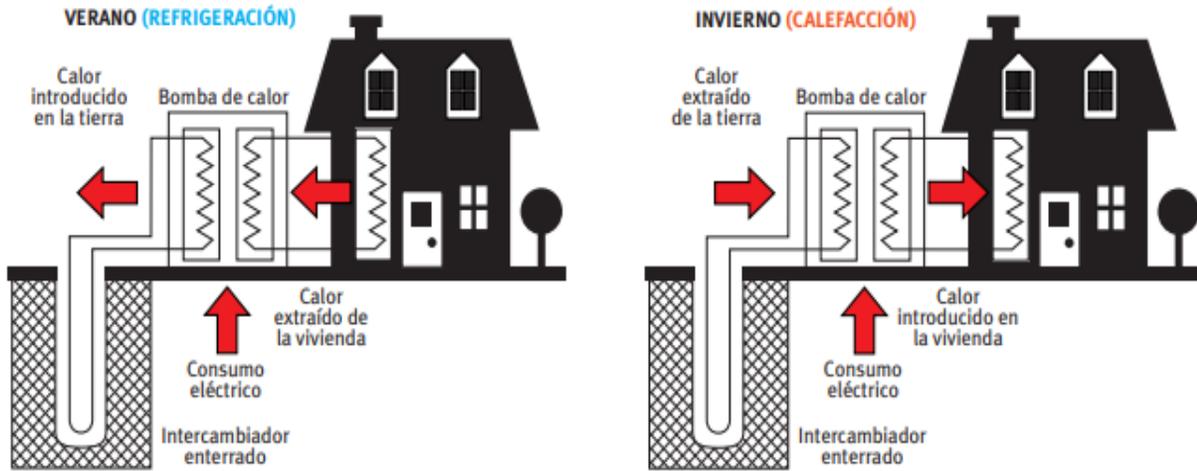


Figura 2.7. Esquema del funcionamiento de una Bomba de Calor Geotérmico (ATECYR, 2012)

Una gran ventaja es que las BCG poseen una gran flexibilidad de diseño y se pueden instalar tanto en nuevas edificaciones como en situaciones de reacondicionamiento. Las tuberías requeridas para las BCG tienen garantías de 25 a 50 años y las bombas 20 años más. Además, los componentes requeridos para el espacio habitable son accesibles para poder garantizar el mantenimiento.

La calefacción y refrigeración de edificios representa el 40% de toda la demanda energética a nivel mundial. Por lo tanto, el uso de una fuente de energía renovable (como el calor geotérmico) es una opción atractiva para los países que tienen objetivos a largo plazo en sostenibilidad ambiental.

Entre los inconvenientes que se presentan para las BCG el más importante es el alto costo de instalación ya que sus costos iniciales son significativos, especialmente si se requiere instalar o actualizar conductos en la propiedad y el periodo de retorno de la inversión es de 5 a 10 años (López *et al.*, 2018).

En la mayoría de los casos, el grado en que la exploración geotérmica afecta al medio ambiente es proporcional a la escala de su exploración (Lunis *et al.*, 1991). La Tabla 2.1 resume la probabilidad y la gravedad relativa de los efectos sobre el medio ambiente del desarrollo de este tipo de proyectos geotérmicos.

Tabla 2.1. Probabilidad y gravedad del impacto ambiental potencial de los proyectos geotérmicos de uso directo (Dickson *et al.*,2003)

Impacto	Probabilidad de ocurrencia	Gravedad de las consecuencias
Contaminación de la calidad del aire	Baja	Media
Contaminación del agua superficial	Media	Media
Contaminación subterránea	Baja	Media
Hundimiento de la tierra	Baja	Baja - Media
Eliminación de residuos sólidos	Media	Media - Alta

### 2.2.5 Pozos intercambiadores de calor y estructuras termoactivas

Los pozos intercambiadores de calor (BHE, por sus siglas en inglés) son sistemas con uno o dos bucles de tuberías conductoras de calor y se encuentran rodeados completamente por el suelo. La Figura 2.8 representa una aplicación típica de un pozo intercambiador de calor en el centro de Europa.

Los BHE se pueden instalar en todos los tipos de suelo con alta conductividad térmica. Estos sistemas operan por conducción, es decir, no producen fluidos de formación. Dichos sistemas se instalan en perforaciones de aproximadamente 10 cm de diámetro. La profundidad de perforación depende de los requisitos de diseño y los costos de perforación (Rybach, 2001).

La extracción de calor se realiza mediante la circulación de un fluido en un circuito cerrado de tuberías a través del BHE. El intercambiador de calor del BHE consiste en una tubería en U (de 2 a 4 cm de diámetro). El material de relleno debe cumplir con las siguientes características: asegurar un buen contacto térmico entre el intercambiador de calor y el suelo circundante, tener una conductividad térmica alta y poder bombearse fácilmente (Rybach *et al.*, 2000). Las estructuras termoactivas son sistemas cerrados que permiten el intercambio de calor entre el sub suelo y la edificación. Sus dos componentes principales son los elementos estructurales (pilas, túneles, etc.) que intercambian energía con el terreno y las losas que dispersan la energía en las edificaciones (Figura 2.9) (Hosokawa, 2019). Las estructuras termoactivas tienen como objetivo disminuir el uso de las energías provenientes de fuentes que generan una gran cantidad de gases de efecto invernadero. Como este tipo de estructuras tienen poco tiempo de implementación, los análisis sobre su comportamiento son limitados y no se tienen metodologías de diseño que permitan considerar los diferentes mecanismos físicos que se llevan a cabo durante su funcionamiento (Barba, 2018).

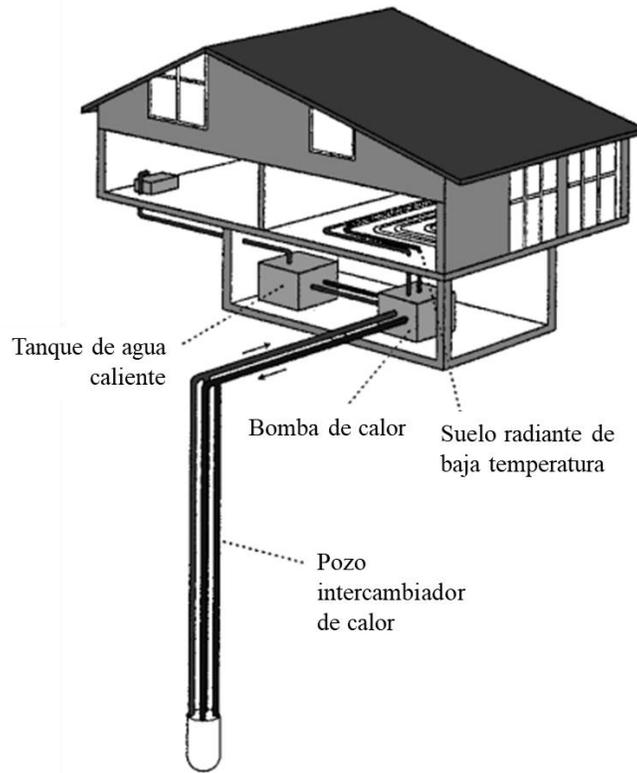


Figura 2.8. Aplicación típica de un sistema de pozo intercambiador de calor (Rybach, 2001)



Figura 2.9. Suelo radiante (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2014)

### 2.2.6 Usos a nivel mundial y experiencias en México

En 1852 el británico William Thomson planteó la hipótesis de las bombas de calor, pero no fue hasta 1856 que Peter Rittinger aplicó esta hipótesis y diseñó las bombas de calor para secar la sal en Austria. En 1912 se registró la primera patente de las BCG en Suiza y fueron diseñadas para el sector residencial.

A nivel mundial, en los últimos 10 años los usos directos de energía geotérmica ascendieron a 117,740 GWh/año (García y Martínez, 2012). Hoy en día las BCG son la tecnología con mayor crecimiento en el área termo-mecánica. Las BCG se utilizan en 43 países, las regiones de Norteamérica y Europa son las que más invierten en este tipo de tecnología junto con China, que en el 2017 alcanzó una capacidad instalada de Bombas de Calor Geotérmico de 20,000 MW. Kjellsson *et al.* (2010) mencionan que en Suecia las BCG se usan para las casas y en Europa la mayoría de las BCG están diseñadas para carga pico de calefacción. Este sistema también se implementa fuera del uso habitacional, un ejemplo es la estación Pacífico del metro de Madrid donde se climatizan 1090 m<sup>2</sup>.

En México no se tienen retos técnicos ya que la condición geológica del país es apta para este tipo de sistema. Las principales limitaciones están relacionadas con los altos costos iniciales, su periodo de retorno y el desconocimiento de la tecnología por parte de usuarios potenciales y gobiernos (García y Martínez, 2012).

El 23 de agosto de 2019, el Gobierno de México implementó un sistema de BCG para operar en la sala del Centro de Evaluación, Certificación y Capacitación en Bombas de Calor Geotérmica (CECCAB) del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. El objetivo de este centro es promover los usos directos de la geotermia. Así, es posible medir los parámetros requeridos para un estudio de eficiencia energética, comparar los consumos eléctricos de una BCG con los de un equipo de aire acondicionado y difundir este tipo de sistema en el país (Gobierno de México, 2019).

Con la pandemia se incrementó el consumo de energía en México aunado a la demanda provocada por las consecuencias del cambio climático y temperaturas extremas en algunos estados. Debido a este incremento se necesitan nuevas opciones para proporcionar energía a los habitantes del país. En este contexto, se ha tenido un gran avance en la investigación y aplicación de las BCG en México.

### **2.3 Transferencia de calor en suelos**

En el proceso de transferencia de calor, la energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, sumado a un cambio de entropía, con el fin de lograr un equilibrio térmico (Domingo, 2011). La transferencia de calor no se puede detener, pero sí desacelerar con ayuda de aislantes. Siempre que exista un desequilibrio de calor, este procede a transferirse a través de los diferentes mecanismos disponibles. Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Figura 2.10). Es importante señalar que, la conducción de calor se rige por las propiedades térmicas del suelo, la capacidad calorífica volumétrica y la conductividad térmica.

#### **2.3.1 Mecanismos de transferencia de calor en suelos**

##### **2.3.1.1 Conducción**

En este mecanismo, la energía calorífica se transmite por contacto directo entre dos o más cuerpos a diferentes temperaturas. La transferencia de calor se realiza mediante acoplamientos entre las moléculas del sistema, unas en zonas calientes con mayor energía térmica y otras en las zonas frías con menor energía térmica (Domingo, 2011). La conducción es de gran importancia en sólidos y de menor importancia en líquidos y gases. Lo anterior se debe a que sus moléculas están muy juntas y se facilita la transferencia de calor entre ellas, La conducción es el mecanismo de transferencia que predomina en los suelos debido a la cercanía de las moléculas de su composición.

### ***2.3.1.2 Convección***

La transferencia de calor por convección se realiza mediante el movimiento físico de moléculas calientes de las zonas de altas temperaturas a las zonas de baja temperatura y viceversa (Domingo, 2011). En la convección libre, el aire o agua se alejan del cuerpo caliente a medida que el agua o aire caliente asciende y son desplazados por una porción más fría de agua o aire. En la convección forzada, el aire o agua se mueven forzosamente a través de la superficie de un cuerpo (como el viento) y eliminan el calor del cuerpo de manera eficiente (Sokolova, 2019). Este modo de transferencia predomina en líquidos y gases.

### ***2.3.1.3 Radiación***

La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura  $T$ , y puede ser absorbida por todos los cuerpos, aumentando su temperatura (Domingo, 2011).

La radiación es el único medio de transmisión de calor en el vacío y puede ser muy importante para altas temperaturas. La transferencia de calor por radiación no puede ser impedida nunca de manera completa, ya que el simple hecho de tener una temperatura provoca una emisión de radiación.

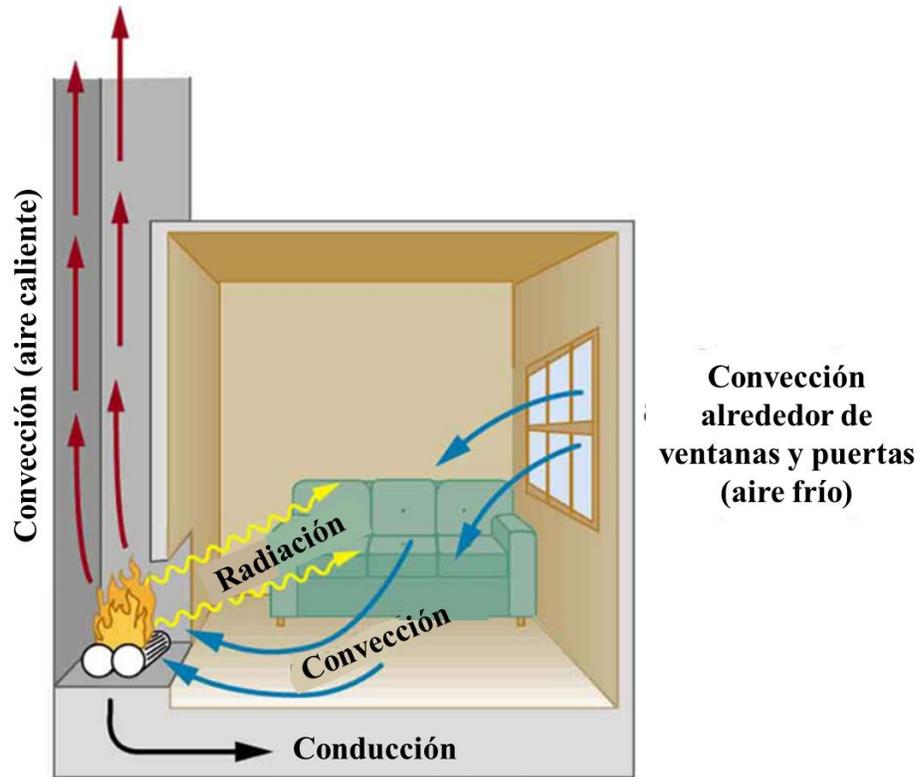


Figura 2.10. Ejemplo de los mecanismos de transferencia de calor (Peter y Hinrichs, 2012)

### 2.3.2 Propiedades térmicas de los suelos

Las propiedades térmicas del suelo influyen en la distribución de la energía a través de la composición del suelo. Las principales propiedades térmicas del suelo son la capacidad calorífica volumétrica, la conductividad y la difusividad térmica.

#### 2.3.2.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica se refiere a la capacidad de producción de calor que tiene un material. Es una propiedad específica de cada material que caracteriza el transporte de calor en estado estacionario (Suárez-Domínguez *et al.*, 2018) y se puede calcular de forma general con la siguiente ecuación:

$$\lambda(T) = \rho(T) * C_p(T) * a(T) \quad (2.2)$$

donde  $\lambda$  es la conductividad térmica;  $\rho$  es la densidad del material;  $C_p$  es la capacidad calorífica y  $a$  es la difusividad térmica.

La conductividad térmica del suelo está influenciada por una amplia gama de características del suelo como la porosidad, contenido de agua, textura, mineralogía, contenido de materia orgánica,

estructura y temperatura del suelo (Ochsner, 2017). Entre los componentes comunes del suelo, el cuarzo tiene la conductividad más alta y el aire la más baja (Tabla 2.2). Por lo tanto, los suelos arenosos tienen valores de conductividad térmica más altos que otros suelos.

Tabla 2.2. Conductividad térmica, densidad y calor específico de los componentes más comunes del suelo a 10°C (Ochsner, 2017)

Material	Conductividad térmica ( $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	Densidad ( $g cm^{-3}$ )	Calor específico ( $J g^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )
Cuarzo	8.8	2.66	0.75
Arcilla	3.0	2.65	0.76
Materia orgánica	0.30	1.3	1.9
Agua	0.57	1.00	4.18
Hielo	2.2	0.92	2.0
Aire	0.025	0.00125	1.0

### 2.3.2.2 Difusividad térmica

La difusividad térmica del suelo es la relación entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica ( $m^2 s^{-1}$ ). Este parámetro indica la velocidad a la que se transmite un cambio de temperatura a través del suelo por conducción. Cuando esta propiedad es alta, los cambios de temperatura se transmiten rápidamente a través del suelo. La difusividad térmica es menos sensible al contenido de agua de los suelos que la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica (Ochsner, 2017).

### 2.3.2.3 Capacidad calorífica

La capacidad calorífica del suelo es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de volumen del suelo en un grado Celsius ( $J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ). Esta propiedad térmica aumenta de forma lineal a medida que aumenta el contenido de agua del suelo y también es una función lineal de la densidad. La capacidad calorífica se puede calcular como;

$$C = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta \quad (2.3)$$

donde  $\rho_b$  es la densidad del suelo,  $c_s$  es el calor específico de los sólidos del suelo,  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $c_w$  es el calor específico del agua y  $\theta$  es el contenido volumétrico del agua. Para aumentar la temperatura de un suelo húmedo y denso, es necesaria más energía que para aumentar la temperatura de un suelo seco y menos denso (su capacidad calorífica es menor).

## 2.4 Fundamentos para el análisis de transferencia de calor en pozos intercambiadores de calor y pilas de energía

### 2.4.1 Escala de análisis

Los intercambiadores de calor geotérmico (GHEs, por sus siglas en inglés) tienen diversas escalas de espacio y tiempo, lo cual dificulta las estimaciones de su respuesta térmica. Como la mayoría de los modelos analíticos de transferencia de calor se basan en suposiciones sobre los procesos térmicos en el tiempo. Así, es necesario considerar todas estas escalas en el análisis térmico de los intercambiadores de calor (Li, 2015). Li *et al.* (2014) establecen que analizando la ecuación diferencial de conducción de calor se pueden evaluar las escalas de tiempo para la transferencia de calor a través de los intercambiadores de calor geotérmico como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

Para un rango de espacio radial  $\Delta r$ , la ecuación 2.4 puede reescribirse como (Benjan, 2013).

$$\frac{\Delta T}{t} \sim \frac{\alpha}{\Delta r} \frac{1}{\Delta r} \left( \Delta r \frac{\Delta T}{\Delta r} \right) \quad (2.5)$$

donde  $t$  es el tiempo estimado,  $\alpha$  es la difusividad térmica del medio y “~” indica que es del mismo orden de magnitud (Benjan, 2013). Cuando el término transitorio de la izquierda es comparable al valor de conducción de calor de la derecha, el tiempo  $t$  se puede estimar reorganizando la relación de escala de la ecuación 2.5, de tal manera que se obtiene (Li *et al.*, 2014):

$$t \sim \frac{(\Delta r)^2}{\alpha} \quad (2.6)$$

De la ecuación 2.6 se pueden identificar varias escalas de tiempo relevantes, siempre que se conozcan las magnitudes de las difusividades térmicas del material de inyección del pozo ( $\alpha_b$ ) y del suelo ( $\alpha_s$ ).

Se estima que cuatro escalas de longitud y ocho de tiempo pueden estar involucradas en el proceso térmico de los pozos intercambiadores de calor geotérmico (Figura 2.11). La primera escala espacial es el diámetro del pozo,  $r_b$  (~0.1 m), y su tiempo asociado ( $t_b \sim r_b^2 / \alpha_b$ ) es del orden de 1 h, durante el cual el efecto de la capacidad calorífica del material de relleno del pozo es significativo (Li *et al.*, 2014). La segunda escala espacial de importancia es la distancia media entre dos pozos adyacentes (L); donde su tiempo correspondiente ( $t_L \sim L^2 / \alpha_s$ ) es del orden de un mes y la interacción térmica entre pozos adyacentes se vuelve importante. La escala espacial más grande puede ser de decenas de metros o más, como la mitad de la longitud de un pozo,  $H/2$ , y la escala horizontal de un grupo de GHE. La escala de tiempo asociada ( $t_H \sim H^2 / 4\alpha_s$ ) es tan larga como el ciclo de vida de un

intercambiador de calor geotérmico. Hay otra escala de tiempo,  $t_r \sim H/u$ , (donde  $u$  representa la velocidad del fluido en los GHE) llamada tiempo de resistencia; suele durar varios minutos y representa el tiempo en el cual se debe abordar la capacidad calorífica del fluido portador de calor (Li *et al.*, 2014)

Es importante determinar la respuesta de temperatura horaria a corto plazo de los GHE para el análisis energético horario y el control óptimo de los sistemas de Bombas de Calor Acopladas al suelo (GCHPs, por sus siglas en inglés). Por otra parte, la respuesta a largo plazo determina la viabilidad general de un sistema desde el punto de vista del ciclo de vida (Li *et al.*, 2015).

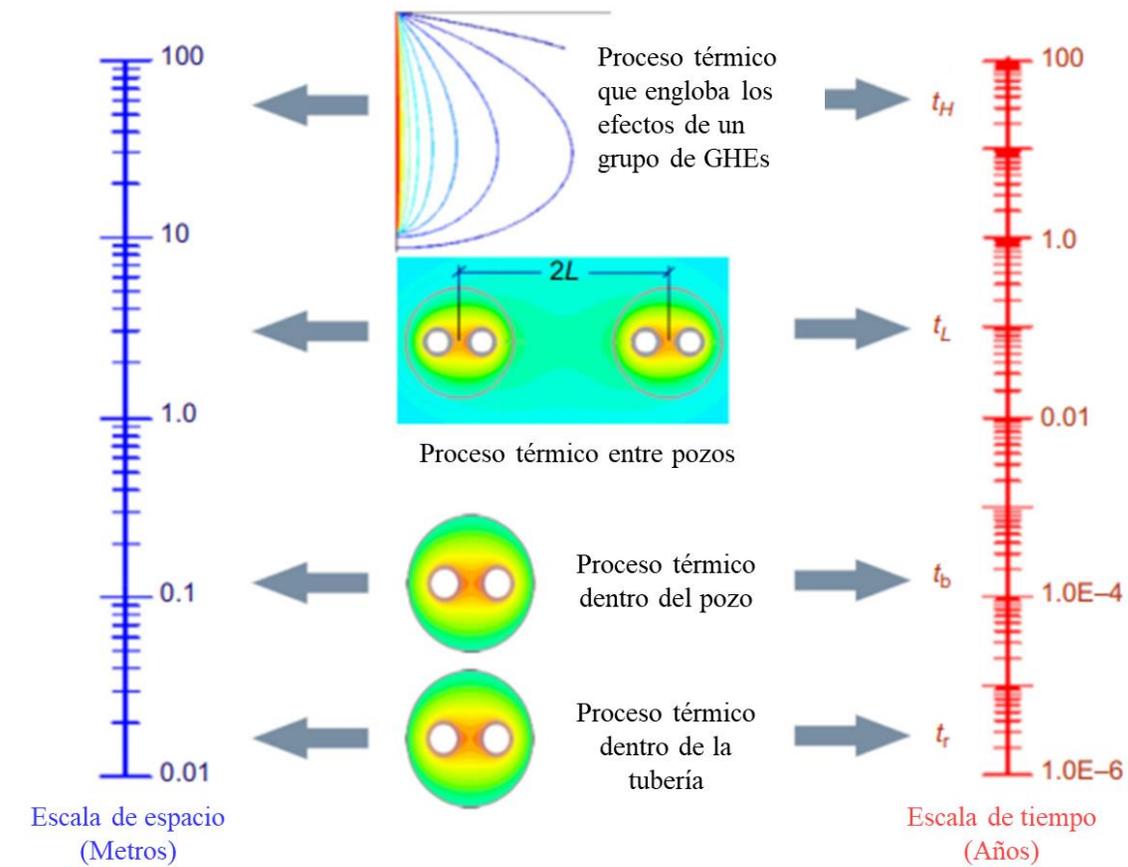


Figura 2.10. Escalas de tiempo y espacio involucradas en el proceso térmico de pozos Intercambiadores de Calor Geotérmico (Li *et al.*, 2014).

### 2.4.2 Consideraciones generales

Se deben hacer algunas suposiciones al derivar una solución analítica. La Tabla 2.3 muestra las suposiciones más comunes a considerar.

Existen varias expresiones teóricas para determinar la conductividad térmica equivalente de los suelos,  $k_{s,e}$ ; por ejemplo, la ecuación 2.7.a representa la conductividad equivalente para un medio terrestre en capas horizontales y la ecuación 2.7.b para un medio terrestre en capas verticales:

$$\frac{1}{k_{s,e}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N b_i} \sum_{i=1}^N k_{s,i} b_i \quad (2.7.a)$$

$$\frac{1}{k_{s,e}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N b_i} \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{k_{s,i}} \quad (2.7.b)$$

donde  $k_{s,i}$  y  $b_i$  son la conductividad térmica y el espesor de la  $i$ -ésima capa del suelo, respectivamente y,  $N$  es el número total de capas. Estas suposiciones se utilizan en modelos analíticos de GHE y se han verificado parcialmente mediante simulaciones numéricas (Eskilson, 1987).

Tabla 2.3. Suposiciones para considerar al derivar una solución analítica (Li *et al.*, 2014)

Suposición	Descripción
Suposición 1	Se supone que el terreno tiene una extensión finita o semi-infinita, dependiendo de si se considera o no la influencia de la superficie.
Suposición 2	El suelo tiene una temperatura inicial uniforme (temperatura del suelo no perturbada efectiva). Si se considera la superficie, esta temperatura inicial puede usarse como una condición límite de temperatura constante (BC por sus siglas en inglés) para la superficie.
Suposición 3	La BC para la pared del pozo o tubería de transferencia de calor es un fluido o una temperatura constantes, siendo más conveniente el BC de flujo constante.
Suposición 4	Si no se puede ignorar el efecto de la filtración de agua subterránea, se suele suponer que el flujo es homogéneo y paralelo a la superficie.
Suposición 5	Aunque el suelo suele ser estratificado y no homogéneo, el suelo puede tratarse como un medio con una conductividad térmica equivalente ( $k_{s,e}$ ).

### 2.4.3 Formalización del problema

El problema de la transferencia de calor, a través de los GHEs, se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$q_l = \frac{T_f(t) - T_{s,0}}{R(t)} = \frac{\Delta T}{R(t)} \quad (2.8)$$

donde  $T_f$  es la temperatura promedio del fluido circulante,  $T_{s,0}$  es la temperatura efectiva no perturbada del suelo,  $q_l$  es la tasa de transferencia de calor del GHE por unidad de tiempo por unidad de longitud y  $R$  es la resistencia térmica total.

A pesar de que  $R(t)$  es una función del tiempo, los modelos analíticos la separan en una parte dependiente e independiente del tiempo para simplificar el análisis. La parte dependiente del tiempo se denomina “función  $g$ ” (Li *et al.*, 2014). La función  $g$  tiene la misma dimensión que la resistencia térmica y es completamente consistente con la unidad. En otras palabras, la resistencia térmica no estacionaria ( $G$ ) puede entenderse como la respuesta de la temperatura en el suelo debido a un cambio de escalón unitario en el flujo de calor,  $q_l$  (Li *et al.*, 2014). Con base en la definición anterior, la ecuación 2.8 puede reescribirse como:

$$\Delta T = q_l R(t) = q_l [R_s + G(x, t)] \quad (2.9)$$

donde  $x$  representa las coordenadas del punto bajo consideración y  $R_s$  es la parte independiente del tiempo de la resistencia térmica  $R$ , que depende de la elección de  $x$ .

La temperatura  $T_f$  en la ecuación 2.8 es la temperatura promedio de los bucles de tierra. Por lo tanto, es necesario otro modelo o suposición para determinar las temperaturas de los fluidos en entrada y salida. Una suposición frecuentemente utilizada es que  $T_f$  es aproximadamente igual al promedio de las temperaturas de los fluidos de entrada y salida del GHE (ASHRAE, 2011). De esta forma, las temperaturas de entrada y salida,  $T_{f,i}$  y  $T_{f,0}$ , quedan definidas por:

$$T_{f,i}(t) = T_f(t) + \frac{q_l H}{2\rho_f c_f V_f} \quad (2.10)$$

$$T_{f,0}(t) = T_f(t) - \frac{q_l H}{2\rho_f c_f V_f} \quad (2.11)$$

donde el subíndice  $f$  denota fluido;  $H$  es la longitud del GHE,  $\rho$ ,  $c$  y  $V$  son densidad, calor específico y caudal volumétrico, respectivamente. La clave para el análisis de transferencia de calor es primero determinar  $G$  y  $R_s$  para poder determinar  $T_f$ ,  $T_{f,i}$  y  $T_{f,0}$  (Li *et al.*, 2014).

#### 2.4.4 Teorema de Duhamel (principio de superposición)

El teorema de Duhamel es una herramienta teórica para desarrollar soluciones para la conducción de calor en condiciones dependientes del tiempo y/o términos de fuentes de energía variables en el tiempo (Li *et al.*, 2014). En las aplicaciones reales, la tasa de transferencia de calor de los GHE cambia constantemente debido a las variaciones en las cargas de refrigeración o calefacción de los

edificios. El teorema de Duhamel establece que los problemas de cargas variables en el tiempo se pueden abordar fácilmente utilizando la solución del problema para una carga de escalón unitario (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$T_1(x, t) = T_{s,0} + \int_0^t q_l(\tau) \frac{\partial G(x, t - \tau)}{\partial t} d\tau \quad (2.12)$$

donde  $T_1$  es la temperatura en el punto bajo consideración,  $x$ ; la función dependiente del tiempo  $q_l(\tau)$  es la tasa de intercambio de calor de un GHE; y  $\tau$  es una variable integral con la dimensión del tiempo. La función  $g$  es la función de respuesta para el cambio de escalón unitario en la carga de un GHE (idéntico a la ecuación 2.9).

Dado que las cargas de calefacción y refrigeración de un edificio están comúnmente disponibles como valores constantes escalonados (Figura 2.11), es conveniente expresar la ecuación 2.12 como:

$$T_1(x, t) = T_{s,0} + \sum_{j=0}^{N-1} \Delta q_j G(x, t - j\Delta t) \quad (2.13)$$

donde  $\Delta q_j = q_{j+1} - q_j$  es el cambio gradual en  $q_l$  al comienzo de  $(j+1)$ -th en el intervalo de tiempo que se ilustra en la Figura 2.11. Las ecuaciones 2.12 y 2.13 implican que la respuesta de temperatura de cualquier  $q_l$  variable en el tiempo se determina una vez que se dispone de la función  $g$  y en ella se debe centrar el análisis de transferencia de calor (Li *et al.*, 2014).

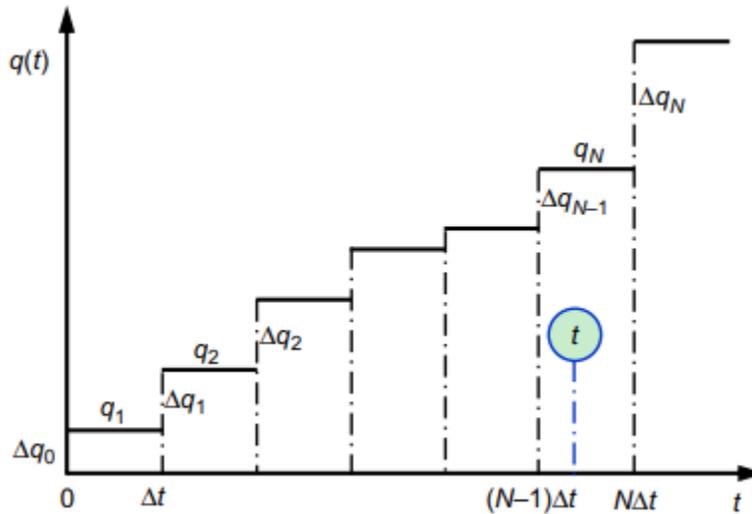


Figura 2.11. Definiciones de las variables de la ecuación 2.13 y la carga variable  $q(t)$  de los intercambiadores de calor del suelo (Li *et al.*, 2014)

## 2.5 Soluciones analíticas para la transferencia de calor en pozos intercambiadores de calor y pilas de energía

### 2.5.1 Generalidades

El análisis de la transferencia de calor en los GHEs supone un gran desafío, ya que implica un conjunto de factores e incertidumbres que influyen en las propiedades térmicas del suelo. Al respecto, se han realizado una gran cantidad de estudios y se han logrado grandes avances. Sin embargo, los informes de estos logros se encuentran dispersos en diversas fuentes (Li *et al.*, 2016).

Los enfoques analíticos son más prácticos que los métodos numéricos en la ingeniería aplicada. Los métodos numéricos son capaces de tomar en cuenta todos los procesos térmicos, pero consumen mucho tiempo en simulaciones que implican considerar toda la vida útil de los GHE (Spitler y Bernier, 2011). A pesar de las complicadas fórmulas matemáticas, los métodos analíticos son más utilizados para estudios académicos y en la práctica.

La mayoría de los modelos analíticos suponen que la transferencia de calor de los GHE es conducción de calor pura (denominados modelos de conducción de calor puro). Dichos métodos ignoran otros mecanismos de transferencia de calor, como la transferencia de humedad, el movimiento de aguas subterráneas, etc. Por otra parte, los modelos analíticos que consideran estos efectos se denominan modelos de conducción de calor no puros (Li *et al.*, 2016).

### 2.5.2 Cálculo de la resistencia térmica de la perforación

Debido a que el suelo es un medio infinito con una capacidad térmica infinita, la transferencia de calor hacia y desde el suelo es transitoria. En este escenario, se consideran escalas de tiempo largas y grandes distancias entre los intercambiadores de calor. Sin embargo, cuando se consideran escalas de tiempo más cortas conviene analizar el proceso de transferencia de calor usando resistencias térmicas. Este es el caso de la transferencia de calor entre el fluido portador de calor en las tuberías U y la pared del pozo, que a menudo se aproxima a una condición estable (Javed, 2016) y se define como:

$$R_b = \frac{T_{f,1} - T_b}{q_b} \quad (2.14)$$

donde  $T_{f,1}$  es la temperatura media local del fluido ( $^{\circ}$  C),  $T_b$  es la temperatura de la pared del pozo ( $^{\circ}$  C) y  $q_b$  es la tasa de transferencia de calor por unidad de longitud (W/m).

El concepto de resistencia térmica del pozo a menudo se visualiza como una suma en serie de resistencias. La resistencia total del pozo ( $R_b$ ) consta de dos partes: la resistencia de la tubería ( $R_p$ ) y la resistencia del concreto ( $R_g$ ). La resistencia de la tubería incluye la resistencia convectiva del fluido en la tubería ( $R_{pic}$ ) y la resistencia conductiva de la tubería ( $R_{pc}$ ). Como se muestra en la

siguiente ecuación, la resistencia de la tubería se calcula para una sola tubería y luego se divide entre el número total de tuberías:

$$R_b = R_g + \frac{R_p}{N} = R_g + \frac{R_{pc} + R_{pic}}{N} \quad (2.15)$$

donde  $N$  es 2,4 o 6 para una tubería en U. La variable  $N$  explica el hecho de que las resistencias de las tuberías estén en paralelo.

La resistencia térmica del pozo también puede presentarse en forma de red térmica. Para una sola tubería en U, la resistencia térmica de estado estacionario de un intercambiador de calor se representa mediante una red térmica de tres resistencias o la red térmica,  $\Delta$  (Figura 2.12). Esta red se basa en las siguientes relaciones entre los flujos de calor  $q_1$  y  $q_2$  y las temperaturas del fluido  $T_{f1}$  y  $T_{f2}$ :

$$q_1 = \frac{T_{f1} - T_{b,avg}}{R_{1-b}} + \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_{1-2}} \quad (2.16)$$

$$q_2 = \frac{T_{f2} - T_{b,avg}}{R_{2-b}} + \frac{T_{f2} - T_{f1}}{R_{1-2}} \quad (2.17)$$

donde  $R_{1-b}$  y  $R_{2-b}$  son las resistencias térmicas entre la tubería 1 o 2 y la pared del pozo, respectivamente y  $R_{1-2}$  es la resistencia térmica de fluido a fluido entre las tuberías 1 y 2.

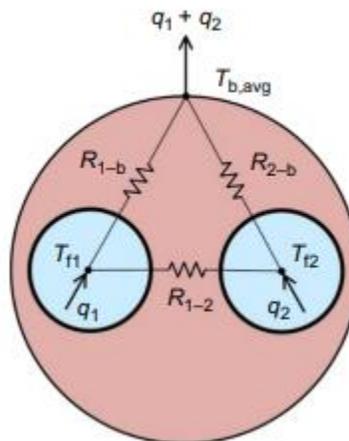


Figura 2.12  $\Delta$  red de resistencias para un pozo con una sola tubería en U (Javed y Spitler, 2016)

La resistencia total del pozo ( $R_b$ ) se puede determinar ajustando las temperaturas del fluido  $T_{f1} = T_{f2}$  y resolviendo dos resistencias paralelas  $R_{1-b}$  y  $R_{2-b}$ :

$$R_b = \frac{R_{1-b} R_{2-b}}{R_{1-b} + R_{2-b}} \quad (2.18)$$

También es posible determinar la resistencia interna total ( $R_a$ ) entre las dos tuberías resolviendo las resistencias en paralelo  $R_{1-2}$  y la suma de las resistencias en serie  $R_{1-b}$  y  $R_{2-b}$ .

$$R_a = \frac{R_{1-2}(R_{1-b} + R_{2-b})}{R_{1-2} + R_{1-b} + R_{2-b}} \quad (2.19)$$

La ecuación 2.19 puede reescribirse para obtener la resistencia de acoplamiento directo  $R_{1-2}$  entre dos tuberías:

$$R_{1-2} = \frac{R_a(R_{1-b} + R_{2-b})}{R_{1-b} + R_{2-b} - R_a} \quad (2.20)$$

Como las dos tuberías están en simetría geométrica y térmica con dos resistencias  $R_{1-b} = R_{2-b}$ , entonces las ecuaciones 2.20 y 2.18 se definen como:

$$R_b = \frac{R_{1-b}}{2} = \frac{R_{2-b}}{2} \quad (2.21)$$

$$R_a = \frac{2R_{1-2}R_{1-b}}{2R_{1-b} + R_{1-2}} \quad (2.22)$$

$$R_{1-2} = \frac{2R_a R_{1-b}}{2R_{1-b} - R_a} \quad (2.23)$$

La resistencia térmica no solo es importante para fines de análisis, sino también para el rendimiento del GHE. Al reducir la resistencia térmica, el rendimiento será mejor.

### 2.5.3 Modelos para el análisis de transferencia de calor fuera de la perforación

Los modelos analíticos tratan al GHE como una fuente lineal o una fuente cilíndrica. La solución de fuente cilíndrica representa de forma adecuada la geometría del pozo y las propiedades térmicas, cuando las propiedades de la lechada son diferentes de las propiedades térmicas del suelo. En cambio, la solución de fuente de línea finita puede representar mejor los efectos finales y la respuesta de los GHEs (Splitter y Bernier, 2016).

#### 2.5.3.1 Modelo de Fuente lineal infinita

El término “Método de fuente lineal” se refiere a la solución de un proceso de transferencia de calor por conducción pura que involucra una fuente de línea infinita (ILS, por sus siglas en inglés) que

comienza a generar calor continuamente en el tiempo cero (Spitler, 2016). Esta solución también es conocida como fuente de línea Kelvin y se atribuye a Lord Kelvin (Thomson, 1880). El ILS considera una fuente lineal de producción de calor constante y de longitud infinita rodeada por un medio homogéneo infinito (Figura 2.13). Fue hasta 1927 que Whitehead desarrolló la fuente lineal infinita (Banks, 2015). Más tarde, las soluciones de fuente lineal fueron formuladas por Ingersoll (1948) y Carslaw y Jaeger (1959). La siguiente ecuación representa la solución de fuente lineal de Carslaw y Jaeger que proporciona la temperatura,  $T$ , en un radio,  $r$ :

$$T = T_g + \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi k} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.24)$$

donde  $E_1$  es la integral exponencial,  $T_g$  es la temperatura inicial del suelo,  $q$  es la carga térmica específica,  $k$  es la conductividad térmica del medio homogéneo,  $\alpha$  es la difusividad térmica del medio homogéneo,  $r$  es la distancia radial desde la fuente lineal y  $t$  es el tiempo que se ha aplicado la fuente lineal continua.

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

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n * n!} \quad (2.25)$$

Carslaw y Jaeger (1959) también presentaron una forma simplificada para valores grandes de  $t$ :

$$T = \frac{q}{4\pi k} * \left( \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right) \quad (2.26)$$

con un error máximo en el aumento de temperatura del 2% cuando  $t > 5r^2/\alpha$ .

Las soluciones anteriores representan una fuente lineal infinita. Varios autores sugirieron la aplicación de estas soluciones a los BHE, pero fue Mogensen (1983) quien declaró como se debe aplicar esta fuente a un pozo con tubería U. Mogensen incorpora varias aproximaciones a considerar:

- I. La solución de fuente lineal se utiliza para evaluar la temperatura en la pared del pozo.
- II. Se supone que la transferencia de calor dentro del pozo se encuentra en un estado estacionario y se puede describir como una resistencia térmica efectiva del pozo que se aplica entre el fluido en la tubería U y la pared del pozo.
- III. La temperatura media del fluido dentro del pozo se toma como el promedio simple de las temperaturas de entrada y salida.

Con estas aproximaciones, la respuesta de la temperatura a un pulso de calor constante en un pozo puede representarse usando la solución detallada para la fuente lineal:

$$T_f = T_g + \frac{q}{4\pi k^*} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + q * R^*_b \quad (2.27)$$

donde  $T_f$  es la temperatura media del fluido dentro del pozo ( $^{\circ}$  C),  $T_g$  es la temperatura del suelo en reposo ( $^{\circ}$  C),  $k^*$  es la conductividad térmica efectiva del suelo ( $W m^{-1} k^{-1}$ ) y  $R^*_b$  es la resistencia térmica efectiva del pozo ( $mK W^{-1}$ ).

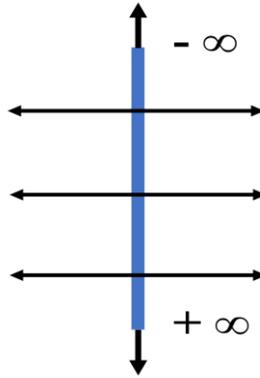


Figura 2.13. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Lineal Infinita (ILS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013)

### 2.5.3.2 Modelo de Fuente Cilíndrica Infinita

El Modelo de fuente cilíndrica infinita (ICS, por sus siglas en inglés), es la solución a un proceso de transferencia de calor por conducción pura que involucra un cilindro infinito que genera calor continuamente a partir del tiempo cero (Figura 2.14). Este modelo considera el radio del pozo geotérmico y la fuente de calor expulsada desde la superficie del pozo. Existen diversas formas de solución de fuente cilíndrica que varían según el tratamiento del material del cilindro. Por ejemplo, Carslaw y Jaeger (1959) contemplaban el interior del cilindro vacío, con todo el flujo del calor saliendo del radio del cilindro. Así, la temperatura media del flujo se obtiene como:

$$T_f = T_g + \frac{q}{k^*} G(F_o) + q * R^*_b \quad (2.28)$$

donde  $F_o$  es el número de Fourier y  $G(F_o)$  representa el ICS:

$$G(F_o) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} (e^{-\beta^2 F_o} - 1) \frac{J_0(\beta)Y_1(\beta) - Y_0(\beta)J_1(\beta)}{\beta^2 (J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta))} d\beta \quad (2.29)$$

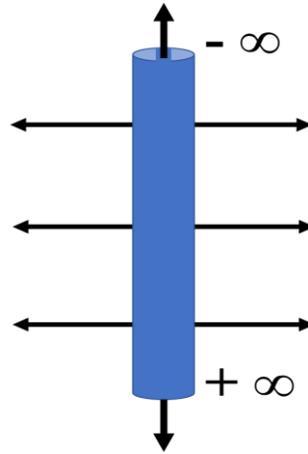


Figura 2.14. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Cilíndrica Infinita (ICS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013)

### 2.5.3.3 Modelo de Fuente lineal finita

Los modelos ILS e ICS son convenientes y fáciles de calcular. Sin embargo, no consideran la naturaleza bidimensional de la transferencia de calor del suelo asociada a los gradientes de temperatura axial que comienzan a ser significativos después de aproximadamente un año (Spitler y Bernier, 2016). Cuando se requiere una respuesta más precisa de la transferencia de calor del suelo para periodos de diseño superiores a un año, se debe usar el modelo de fuente lineal finita (FLS, por sus siglas en inglés), representado en la Figura 2.15.

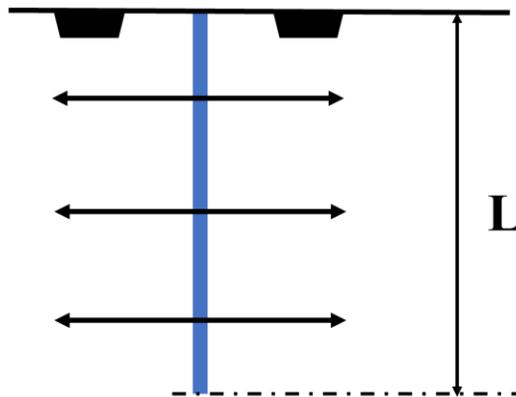


Figura 2.15. Diagrama de funcionamiento del Modelo de Fuente Lineal Finita (FLS) (Ghasemi-Fare y Basu, 2013)

La solución FLS estima 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  $H$ , localizada a una distancia  $D$  de la superficie del suelo. Como se muestra en la Figura 2.16, una imagen de espejo virtual de la línea finita real se ubica sobre la superficie del suelo para manejar la condición de control en la superficie. Para una temperatura superficial constante igual a la temperatura del suelo en reposo,  $T_g$ , la solución FLS está representada por la ecuación 2.30:

$$T(r, z, t) = T_g + \frac{q}{4\pi k^*} \int_D^{D+H} \left( \frac{\operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{at}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{at}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right) dh \quad (2.30)$$

donde  $\operatorname{erfc}$  es la función de error complementaria.

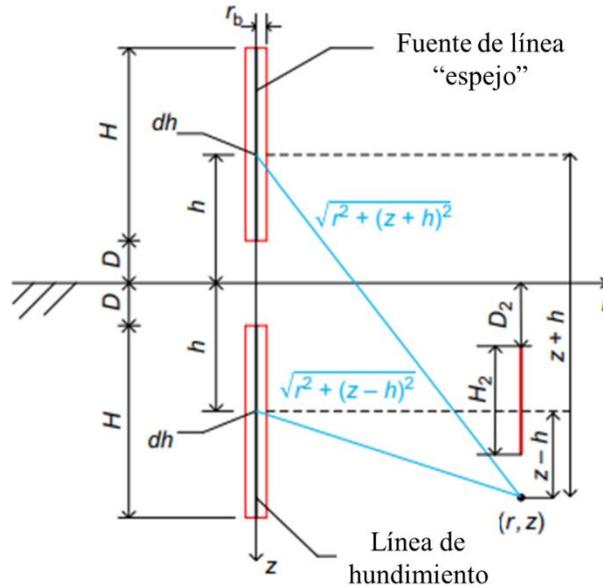


Figura 2.16. Parámetros geométricos utilizados para representar una fuente de línea finita y su imagen espejo (Spitler y Bernier, 2016)

### **3 METODOLOGÍA DE LA ASHRAE PARA EL DISEÑO TÉRMICO DE POZOS INTERCAMBIADORES DE CALOR Y PILAS DE ENERGÍA**

Los ingenieros que diseñan pozos intercambiadores de calor buscan determinar el tamaño mínimo de GHE que proporcione un rendimiento adecuado del sistema durante toda su vida útil. La forma más común es que el diseñador especifique las propiedades térmicas del terreno, el número de pozos, las cargas de la bomba de calor y el diseño del GHE dentro del pozo, con el fin de conocer la profundidad requerida de los pozos, poder ajustarla y realizar las modificaciones correspondientes (Spitler, 2016).

#### **3.1 Clasificación de las metodologías de diseño térmico**

##### **3.1.1 Soluciones directas e iterativas**

Las metodologías de diseño se pueden formular de modo que el tamaño del GHE se proporcione directamente o que el tamaño se ajuste iterativamente hasta cumplir con los criterios de diseño especificados (Spitler, 2000). A continuación, se exponen las soluciones de diseño térmico:

##### **3.1.1.1 Solución de pasos de tiempo (niveles 0-4)**

La solución de los pasos de tiempo utilizada por la metodología de diseño tiene un efecto significativo en la precisión de los requisitos (Cullin y Spitler, 2011). A continuación, se definen los niveles:

- Nivel 0 - Reglas generales: Las reglas generales relacionan la longitud del GHE, las cargas máximas de calefacción/refrigeración del edificio y la capacidad instalada del equipo ( $W m^{-1}$ ). Es difícil que las reglas generales permitan diseñar los GHE de manera adecuada, principalmente por la constante de tiempo prolongada del suelo que rodea al GHE y la relación entre las cargas máximas de calefacción y refrigeración (Spitler, 2007). Las reglas generales que intentan relacionar el tamaño de GHE con las cargas máximas están destinadas a fracasar, a menos que exista una fuerte relación entre las cargas máximas y las cargas anuales y se tengan propiedades térmicas del suelo razonablemente constantes entre las ubicaciones para las que se aplica la regla empírica.
- Nivel 1 – Dos pulsos: Algunos de los primeros métodos de diseño, como el descrito por Kavanaugh (1991), utilizaron un periodo de diseño de una sola temporada de calefacción y una sola temporada de enfriamiento, cuya duración debía determinarla el diseñador.
- Nivel 2 – seis pulsos: El método de diseño de Kavanaugh (1995) utiliza tres pulsos para calefacción y tres para refrigeración: un pulso anual, un pulso mensual y un pulso pico de duración para el usuario.
- Nivel 3 – pulsos de pico mensuales: Este nivel se basa en una representación de las cargas como cargas mensuales totales de refrigeración y calefacción, sobre las cuales suponen las cargas máximas mensuales y se especifican como un pulso rectangular con la magnitud y la duración.
- Nivel 4 – Simulación horaria: Es posible dimensionar el GHE utilizando una simulación horaria de manera iterativa. Cullin y Spitler (2011) describen un programa de diseño que utiliza pasos de tiempo por hora.

### 3.1.1.2 Metodología de transferencia de calor del suelo

Esta metodología incluye a las funciones ILS, ICS, FLS y g. El efecto de usar diferentes métodos en la geometría resultante varía según las cargas, la configuración del pozo y otros factores. El uso de un flujo de calor uniforme al calcular las funciones g puede llegar a sobrestimar las dimensiones de los GHE, mientras que con la superposición de temperatura uniforme de la pared del pozo se obtienen dimensiones menores (Spitler, 2013).

### 3.1.1.3 Tratamiento de la bomba de calor

Algunas herramientas de diseño consideran a la bomba de calor como un modelo polinomial simple que relaciona rechazo de calor/enfriamiento proporcionado y extracción de calor/calentamiento proporcionado, en función de la temperatura del fluido de entrada de la bomba de calor. Esto permite que la dependencia entre la temperatura y la eficiencia, así como las cargas impuestas se tengan en cuenta para los cálculos de diseño (Spitler, 2016). Con base en el esquema de clasificación descrito

anteriormente, la Tabla 3.1 presenta la clasificación de varias herramientas de diseño históricas y actualmente disponibles.

## 3.2 Metodología de la ASHRAE

### 3.2.1 Bases teóricas del método

Las bases teóricas de la ASHRAE para diseñar BHE se basa en el enfoque propuesto por de Kavanaugh (1997). Este método utiliza un conjunto de ecuaciones derivadas del modelo de fuente línea cilíndrica para dimensionar el anillo de tierra. El modelo supone un flujo de calor constante a través del límite exterior del pozo, ignora los efectos finales del pozo y no toma en cuenta las capacidades térmicas del fluido circulante (Fossa y Rolando, 2015).

### 3.2.2 Ecuación fundamental de diseño de la ASHRAE

En el método de dimensionamiento de la ASHRAE, la longitud del campo de perforación requerida se basa en tres tasas de transferencia de calor con diferentes períodos de tiempo. Se contemplan con tasas de transferencia de calor consecutivas:  $Q_1$  de  $t = 0$  a  $t_1$ ,  $Q_2$  de  $t_1$  a  $t_2$  y  $Q_3$  de  $t_2$  a  $t_3$ . Con ayuda de la superposición temporal, la temperatura del pozo ( $T_b$ ) está dada por:

$$T_b - T_g = \frac{Q_1\Gamma(t_3 - 0) + (Q_2 - Q_1)\Gamma(t_3 - t_1) + (Q_3 - Q_2)\Gamma(t_3 - t_2)}{H} \quad (31)$$

donde  $\Gamma$  es el factor de respuesta térmica.

Las siguientes ecuaciones se conocen como el método de dimensionamiento de la ASHRAE. Se presentaron por primera vez en el manual de aplicaciones de la ASHAE y en un artículo de Kavanaugh en 1995 y todavía siguen vigentes en el manual de aplicaciones de la ASHRAE de 2015:

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - W_c)(R_p + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2} - T_p} \quad (32)$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lh} - W_h)(R_p + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2} - T_p} \quad (33)$$

3. Metodología de la ASHRAE para el diseño térmico de pozos intercambiadores de calor y pilas de energía

Tabla 3.1. Resumen de las metodologías de diseño (Spiliter, 2016)

Método	Enfoque de solución		Nivel de solución de tiempo					Metodología de transferencia				Bomba de calor contabilizada	
	Directo	Iterativo	0	1	2	3	4	ILS	FLS	ICS	Función g	Si	No
Bose <i>et al.</i> (1985)	X			X				X				X	
Kacanaugh (1991)	X			X				X				X	
Kacanaugh (1995)	X				X					X		X	
Spitler (2000)		X				X					X	X	
Philippe <i>et al.</i> (2010)		X		X							X	X	
Gaia Geothermal (2014)		X			X			X		X	X	X	
ASHRAE HANDBOOK método 1 (2015)	X			X						X		X	
ASHRAE HANDBOOK método 2 (2015)		X		X							X	X	
BLOCON (2015)		X				X					X		X

donde  $F_{sc}$  es el factor de pérdida de calor por cortocircuito (-),  $L_c$  y  $L_h$  son las longitudes de campo de perforación requeridas para refrigeración y calefacción (m),  $PLF_m$  es el factor de carga parcial durante el mes de diseño (-),  $q_a$  es la transferencia de calor media anual neta al suelo (W),  $q_{lc}$  y  $q_{lh}$  son las cargas máximas de refrigeración y calefacción (W),  $R_p$  es la resistencia térmica de la tubería ( $\text{mk}\cdot\text{W}^{-1}$ ),  $R_{ga}$ ,  $R_{gm}$  y  $R_{gd}$  son las resistencias térmicas efectivas el suelo para los pulsos anuales, mensuales y diarios ( $\text{mk}\cdot\text{W}^{-1}$ ),  $T_g$  es la temperatura del suelo en reposo ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{wi}$  y  $T_{wo}$  son las temperaturas de diseño del fluido de entrada y salida ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_p$  es la temperatura de penalización por interferencia de orificios adyacentes ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $W_c$  y  $W_h$  son las entradas de potencia a la bomba de calor en condiciones máximas de refrigeración y calefacción (W). La longitud requerida del campo de perforación es la mayor de las dos longitudes,  $L_c$  y  $L_h$ . Los valores de  $L_c$  y  $L_h$  se pueden considerar como las longitudes totales del pozo requeridas para evitar exceder los valores mínimos y máximos de la temperatura de entrada de la bomba de calor ( $T_{wi}$ ) en las peores condiciones del suelo.

La convención de signos es la siguiente:  $q_a$  es negativo cuando se extrae del suelo más calor del que se inyecta actualmente; la temperatura de penalización ( $T_p$ ) tiene el mismo signo que  $q_a$  y  $W_h$  y  $W_c$  son siempre positivos. Las longitudes  $L_c$  y  $L_h$  están dadas por:

$$L_c = n_c \times H_c \quad (34)$$

$$L_h = n_h \times H_h \quad (35)$$

donde  $n_c$  y  $n_h$  representan el número de perforaciones necesarias para refrigeración y calefacción,  $H_c$  y  $H_h$  son las longitudes de las perforaciones individuales necesarias para refrigeración y calefacción, respectivamente.

### 3.2.3 Derivación de ecuación fundamental de diseño de la ASHRAE

#### 3.2.3.1 Carga del suelo

Como la longitud del campo de perforación depende de las cargas máximas de calefacción y refrigeración, es importante analizarlas detalladamente. Estas cargas se obtienen sumando las cargas de todas las zonas térmicas de un edificio durante un tiempo determinado. Las potencias requeridas por el compresor en picos de carga,  $W_c$  y  $W_h$  son proporcionadas por los fabricantes de la bomba de calor. Los valores de  $PLF_m$  se seleccionan considerando el tiempo de operación de la bomba de calor y el mes de diseño, cuando se produce la carga máxima del suelo. Finalmente, se debe calcular la transferencia de calor promedio anual neta del suelo,  $q_a$ . Para estimar este valor se puede usar el concepto de horas equivalentes a plena carga (EFLH, por sus siglas en inglés) con la siguiente ecuación:

$$q_a = \frac{(q_{lc} - W_c)EFLH_c + (q_{lh} - W_h)EFLH_h}{8760} \quad (36)$$

Carlson y Thornton (2002) determinaron los valores típicos de  $EFLH_c$  y  $EFLH_h$  para diferentes tipos de edificios y climas.

### 3.2.3.2 Resistencia térmica efectiva del suelo

La ecuación de dimensionamiento de la ASHRAE toma en cuenta las tres resistencias térmicas efectivas del suelo,  $R_{ga}$ ,  $R_{gm}$  y  $R_{gd}$ . Estas resistencias se calculan de la siguiente manera:

$$R_{ga} = \frac{G(Fo_{t3}) - G(Fo_{t3} - Fo_{t1})}{K^*} \quad (37)$$

$$R_{gm} = \frac{G(Fo_{t3} - Fo_{t1}) - G(Fo_{t3} - Fo_{t2})}{K^*} \quad (3.8)$$

$$R_{gd} = \frac{G(Fo_{t3} - Fo_{t2})}{K^*} \quad (3.9)$$

donde  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  son 3650, 3680 y 3680.167 días, respectivamente.

## 3.3 Propuestas de mejora al método de la ASHRAE

### 3.3.1 Determinación de resistencia térmica efectiva de los suelos utilizando funciones $g$

Es posible evitar el uso de la temperatura de penalización ( $T_p$ ) utilizando las funciones  $g$  como factores de respuesta térmica. Con este enfoque, las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 pueden reescribirse como:

$$R_{ga,g} = \frac{g(t_3 - t_0) - g(t_3 - t_1)}{2\pi K^*} \quad (3.10)$$

$$R_{gm,g} = \frac{g(t_3 - t_1) - g(t_3 - t_2)}{2\pi K^*} \quad (3.11)$$

$$R_{gd,g} = \frac{g(t_3 - t_2)}{2\pi K^*} \quad (3.12)$$

donde  $g_{(t_i-t_j)}$  es la función  $g$  evaluada para un período de tiempo correspondiente a  $(t_i - t_j)$  y  $t_0 = 0$ . Se agrega el índice “g” a  $R_{ga}$ ,  $R_{gm}$  y  $R_{gd}$  para indicar que se basan en funciones  $g$  con el propósito de diferenciarlos. La ecuación de dimensionamiento de la ASHRAE basada en funciones  $g$  toma la siguiente forma:

$$L_c = \frac{q_a R_{ga,g} + q_{m,c} R_{gm,g} + q_{h,c} R_{gd,g} + q_{h,c} R^*_b}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2}} \quad (3.13)$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga,g} + q_{m,h} R_{gm,g} + q_{h,h} R_{gd,g} + q_{h,h} R^*_b}{T_g - \frac{(T_{wi} + T_{wo})}{2}} \quad (3.14)$$

Las ecuaciones 3.13 y 3.14 forman la base del método de dimensionamiento alternativo del manual de la ASHRAE (2015). La principal desventaja de estas ecuaciones es la falta de las funciones  $g$  en la literatura. Por lo tanto, Bernier (2013) propuso una herramienta para generar funciones  $g$  para cualquier configuración de pozo.

### 3.3.2 Evaluación de la penalización térmica

#### 3.3.2.1 Enfoque de la ASHRAE

El método de la ASHRAE para evaluar la penalización térmica hace referencia al trabajo de Kavanaugh y Rafferty (1997). Este procedimiento se basa en el concepto de calor difundido dentro de un cilindro cuadrado y una expresión que contiene el cambio de temperatura en la tierra que rodea la perforación ( $T_{p1}$ ):

$$T_{p1} = \frac{\dot{Q}_y \sum_{i=1}^n (r^2_{i+1} - r^2_i) E_{1,i} \left( \tau_N, \left( \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \right) \right)}{4k_{gr} L B^2} \quad (3.15)$$

donde el  $i$ -ésimo radio ( $r_i$ ) representa una capa cilíndrica alrededor del pozo y  $r_1$  es la mitad de la distancia entre BHE. Diversos aspectos de este enfoque son ambiguos, por ello, se prefiere la solución ILS respecto a la ICS. De acuerdo con la ASHRAE, la penalización de temperatura ( $T_{pA}$ ) se expresa como:

$$T_{pA} = T_{p1} \frac{N_4 + 0.5N_3 + 0.25N_2 + 0.1N_1}{N_{tot}} \quad (3.16)$$

donde  $N_4$ ,  $N_3$ ,  $N_2$  y  $N_1$  son el número de pozos rodeados por otros cuatro con un solo BHE adyacente.

### 3.3.2.2 Método de Bernier

La penalización por temperatura ( $T_p$ ) representa una corrección aplicada a la temperatura del suelo para considerar la interferencia térmica entre pozos en un campo de perforación. Bernier *et al.* (2009) propusieron una expresión particular para calcular esta penalización. Esta correlación se basa en una función ( $F$ ) que depende de cuatro parámetros y queda definida como:

$$T_p = \frac{q_y}{2\pi kL} F(t/t_s, B/H, NB, A) \quad (3.17)$$

donde  $H$  es la profundidad del pozo,  $B$  es la distancia entre pozos adyacentes,  $NB$  es el número de perforaciones,  $A$  es la relación de aspecto geométrico (número de perforaciones en la dirección más larga sobre el número de perforaciones en la otra dirección) y  $t_s$  es un tiempo característico ( $t_s = H^2/9\alpha$ ). La función de correlación  $F$  se expresa como la suma de 37 términos con la siguiente ecuación y sus coeficientes se presentan en la Tabla 3.2:

$$F = \sum_{i=0}^{36} b_i * c_i \quad (3.18)$$

Esta correlación tiene algunas restricciones. Es válido para un valor constante de  $B$ , es decir, la distancia entre pozos adyacentes es la misma en todo el campo de perforación. Para los otros parámetros se aplican las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} -2 &\leq \ln\left(\frac{t}{t_s}\right) \leq 3 \\ 4 &\leq NB \leq 144 \\ 1 &\leq A \leq 9 \\ 0.05 &\leq B/H \leq 0.1 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Tabla 3.2. Coeficientes  $b_i$  y  $c_i$  para la correlación  $F$  (Philippe *et al.*, 2010)

$i$	$b_i$	$c_i$
0	7.8189E+00	1
1	-6.4270E+01	B/H
2	1.5387E+02	(B/H) <sup>2</sup>
3	-8.4809E+01	(B/H) <sup>3</sup>
4	3.4610E+00	In(t/t <sub>s</sub> )
5	-9.4753E-01	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup>
6	-6.0416E-02	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>3</sup>
7	1.5631E+00	NB
8	-8.9416E-03	NB <sup>2</sup>
9	1.9061E-05	NB <sup>3</sup>
10	-2.2890E+00	A
11	1.0187E-01	A <sup>2</sup>
12	6.5690E-03	A <sup>3</sup>
13	-4.0918E+01	(B/H)×In(t/t <sub>s</sub> )
14	1.5557E+01	(B/H)×(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup>
15	-1.9107E+01	(B/H)×NB
16	1.0529E-01	(B/H)×NB <sup>2</sup>
17	2.5501E+01	(B/H)×A
18	-2.1177E+00	(B/H)×A <sup>2</sup>
19	7.7529E+01	(B/H) <sup>2</sup> ×In(t/t <sub>s</sub> )
20	-5.0454E+01	(B/H) <sup>2</sup> ×(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup>
21	7.6352E+01	(B/H) <sup>2</sup> ×NB
22	-5.3719E-01	(B/H) <sup>2</sup> ×NB <sup>2</sup>
23	-1.3200E+02	(B/H) <sup>2</sup> ×A
24	1.2878E+01	(B/H) <sup>2</sup> ×A <sup>2</sup>
25	1.2697E-01	In(t/t <sub>s</sub> )×NB
26	-4.0284E-04	In(t/t <sub>s</sub> )×NB <sup>2</sup>
27	-7.2065E-02	In(t/t <sub>s</sub> )×A
28	9.5184E-04	In(t/t <sub>s</sub> )×A <sup>2</sup>
29	-2.4167E-02	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup> ×NB
30	9.6811E-05	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup> ×NB <sup>2</sup>
31	2.8317E-02	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup> ×A
32	-1.0905E-03	(In[t/t <sub>s</sub> ]) <sup>2</sup> ×A <sup>2</sup>
33	1.2207E-01	NB×A
34	-7.1050E-03	NB×A <sup>2</sup>
35	-1.1129E-03	NB <sup>2</sup> ×A
36	-4.5566E-04	NB <sup>2</sup> ×A <sup>2</sup>

Bernier *et al.* (2009) informan que la diferencia en el valor  $T_p$ , cuando se aplica la ecuación 3.18, es inferior al 10% para la mayoría de las condiciones operativas en comparación con las funciones  $g$  de Eskilson (1987).

### 3.3.2.3 Método de Capozza *et al.* (2012)

Un modelo más reciente fue propuesto por Capozza *et al.* (2012), en el cual se introduce la variable  $T_{p,ratio}$  para relacionar la temperatura de penalización obtenida por el modelo ILS y la solución de la función  $g$  de referencia. La evaluación de  $T_p$  ( $T_{pC}$ ) se realiza de la siguiente forma:

$$T_{pC} = (T_{p,ratio})^{-1} \frac{2}{N_{tot}} \sum_{i=1}^{N_{tot}-1} \sum_{j=i+1}^{N_{tot}} \Delta T_{s,ave}(\delta_{i,j}) \quad (3.20)$$

$$T_{p,ratio} = 1 + \left\{ b(N_{tot}) + [1 + b(N_{tot})] * \frac{f(N_{tot}) - 1}{0.05} * \left( \frac{B}{H} - 0.05 \right) \right\} * \exp\left( -\frac{\ln(9F_{0H}) - 3}{6/\ln(-0.07)} \right) \quad (3.21)$$

donde  $\Delta T_{s,ave}$  es la diferencia entre la temperatura promedio de la pared del pozo y la temperatura del suelo no perturbado y  $\delta_{i,j}$  es la diferencia entre los pozos  $i$  y  $j$ .

El método de Capozza *et al.* (2012) se refiere a un caso de estudio en el cual se analiza una planta de calefacción geotérmica de edificio residencial. El grupo de BHE está conformado por 15 elementos en dos filas en forma de matriz triangular. Algunos de los detalles de este caso de estudio se muestran en la Figura 3.1. La planta proporciona el servicio de calefacción y agua caliente al edificio, cuya demanda energética fue medida entre los años 2009 y 2010 (Figura 3.2). Las principales características del sistema se indican en la Tabla 3.3. Cada BHE se compone de una sola tubería en U, con un diámetro exterior de 40 mm y un espesor de pared de 3 mm.

#### *Modelo de fuente lineal finita*

La perturbación ocasionada por los 15 BHE están dadas por la superposición del campo térmico generado por cada BHE. La Figura 3.3 muestra las isotermas del campo de disminución térmica en un plano horizontal después de 10 años. La Figura 3.4 presenta los valores de disminución de temperatura para cada BHE perteneciente a la primera y última fila. Cada barra se divide en dos componentes: las barras continuas representan una cantidad de 4.3°C que es una constante para todos los BHE y las barras rayadas que representan una cantidad residual máxima para los BHE centrales y mínima para los de los costados. En la Figura 3.4 se observa que el valor medio del excedente de la temperatura en las paredes coincide con la temperatura de penalización. La

temperatura de penalización se puede ver gráficamente como el promedio de las cantidades de las barras rayadas del histograma. La temperatura de penalización, evaluada con el método de Capozza *et al.* (2012), presentó un valor de 8.1°C mientras que para la metodología ASHRAE fue de 6.4°C.

Si se considera el volumen de almacenamiento, formado por la envolvente de los cilindros NB de radio  $B/2$  con centro en los BHE (contorno de la línea punteada de la Figura 3.4), la disminución de la temperatura promediada sobre el volumen de almacenamiento es de 9.8°C. Si se considera un volumen de control adicional, compuesto por la envolvente de los cilindros centrados en los BHE y de radio  $3xB/2$ , la disminución promedio de temperatura es de 8.0°C.

Tabla 3.3 Características de la planta (Capozza *et al.*, 2012)

---

Profundidad del pozo $H$	100 m
Longitud total de todos los pozos $L$	1500 m
Espacio entre pozos $B$	4.5 m
Temperatura del suelo sin perturbaciones $T_{\infty}$	15°C
Conductividad térmica del suelo $\lambda$	1.83 W(mk) <sup>-1</sup>
Radio del pozo $r_b$	0.05 m
Difusividad térmica del suelo $\alpha$	7x10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Energía requerida del edificio $E$	173,000 kWh(año) <sup>-1</sup>
Coefficiente de rendimiento estacional de la bomba de calor	3.14
Tasa de intercambio de calor $Q$	13.46 kW
Tiempo de funcionamiento $t$	10 años

---

La temperatura de penalización tiene un valor cercano a la perturbación de la temperatura del suelo, promediada sobre un volumen de control dado por la envolvente de los cilindros centrados en los BHE y de radio igual a tres veces la media distancia entre los BHE (Capozza *et al.*, 2012). El modelo de fuente lineal infinita no depende de la longitud del pozo intercambiador de calor y el resultado se obtuvo por medio de la superposición de la perturbación térmica. La Figura 3.5 muestra las perturbaciones térmicas en cada uno de los BHE después de 10 años de operación.

3. Metodología de la ASHRAE para el diseño térmico de pozos intercambiadores de calor y pilas de energía

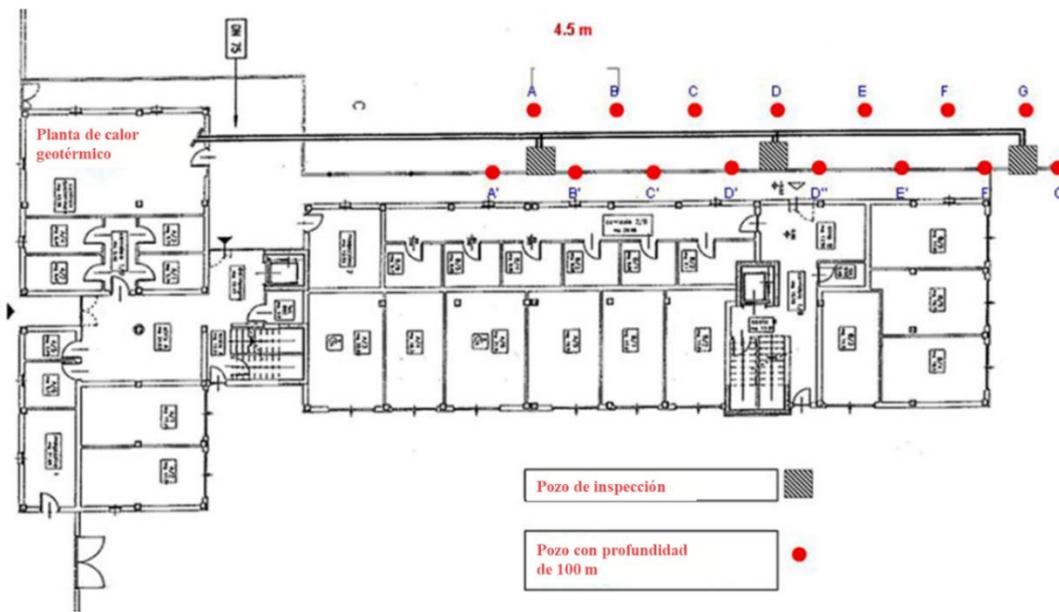


Figura 3.1 Planta del caso de estudio (Capozza *et al.*, 2012)

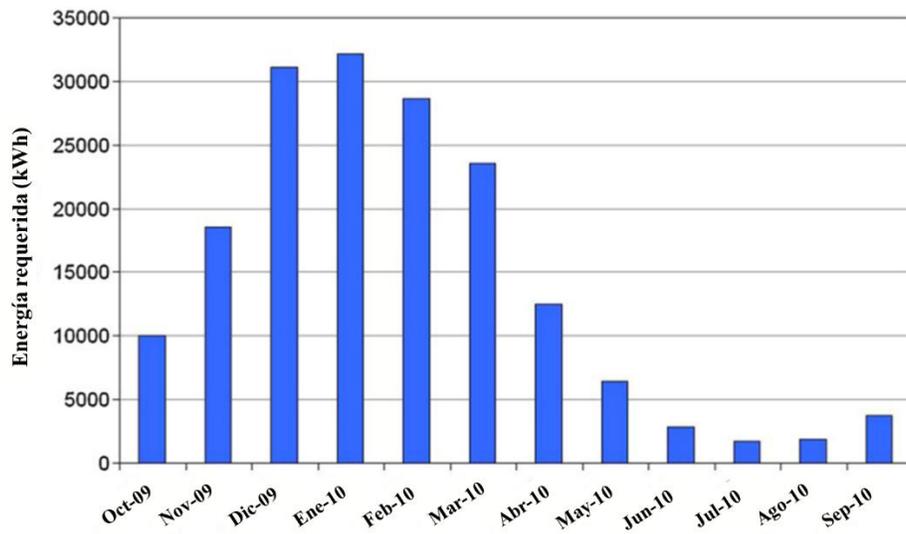


Figura 3.2 Energía requerida por la edificación (Capozza *et al.*, 2012)

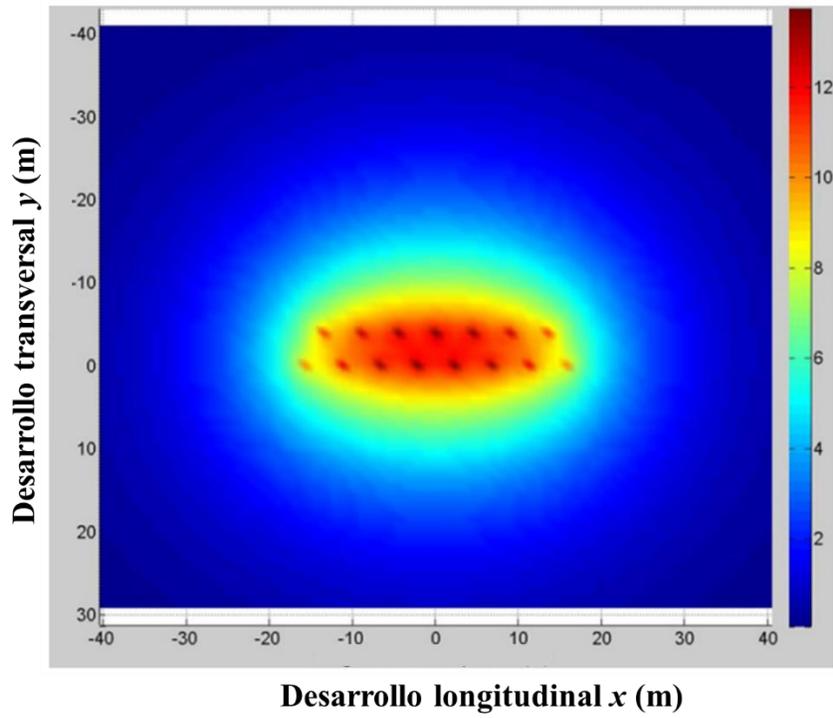


Figura 3.3 Perturbación térmica promedio (Capozza *et al.*, 2012)

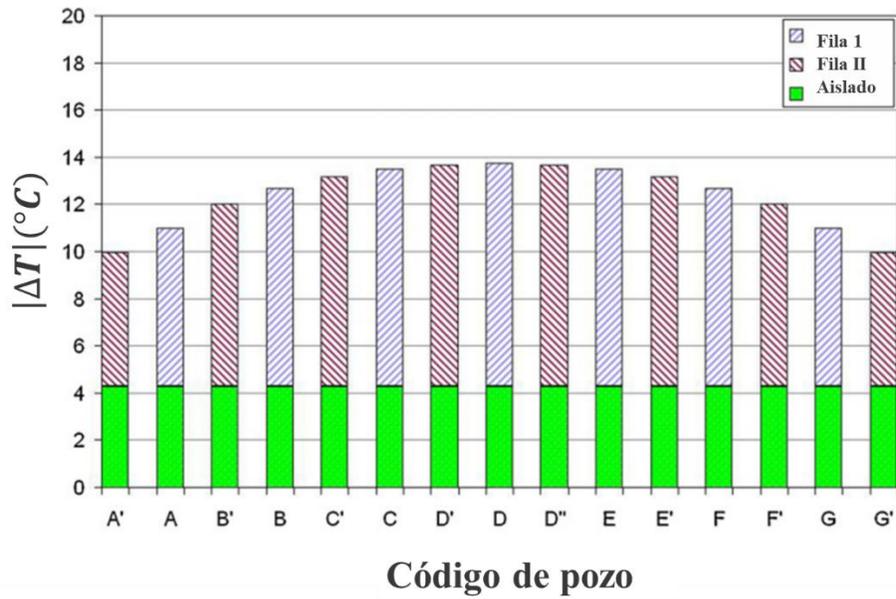


Figura 3.4 Perturbación térmica promedio en los BHE (Capozza *et al.*, 2012)

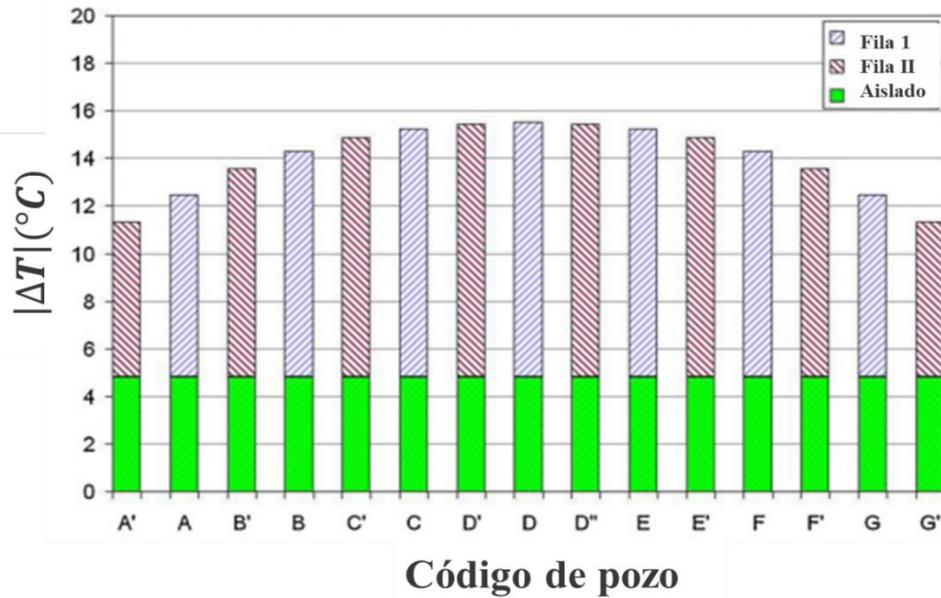


Figura 3.5 Perturbación térmica promedio en los BHE del modelo aproximado (Capozza *et al.*, 2012)

### 3.3.2.4 Método de Fossa y Rolando

El método presentado por Fossa y Rolando (2015) se basa en la suposición de que el término  $T_p$  se puede calcular con un procedimiento similar al de las funciones  $g$ . Dicha propuesta adopta la solución ILS para simplificar el problema. La Figura 3.6 muestra la geometría de referencia, la cual consiste en una matriz regular con un solo BHE rodeado por otros ocho BHE. La distancia entre pozos es  $B$  en las direcciones  $x$  o  $y$ . Además, cuatro BHE se encuentran a una distancia  $B$  del central, mientras que los otros cuatro están separados a una distancia igual a  $\sqrt{2} \cdot B$ . Con base en los principios de superposición espacial, el exceso de temperatura ( $\theta_8$ ) en el BHE central se puede evaluar con la solución ILS al describir a la potencia térmica anual como:

$$\theta_8 = \dot{Q}_y \frac{E_1(\tau_N, B) + E_1(\tau_N, B\sqrt{2})}{\pi k_{gr} L} \quad (3.22)$$

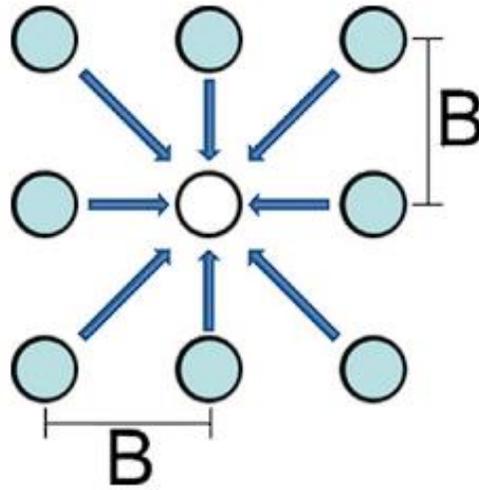


Figura 3.6 Modelo para el cálculo de  $T_{p8}$  con un BHE central (Fossa y Rolando, 2015)

Con base en el modelo actual,  $T_p$  ( $T_{p8}$ ) finalmente se expresa de una forma similar a la de la ASHRAE como:

$$T_{p8} = \theta_8 \frac{aN_4 + bN_3 + cN_2 + dN_1}{N_{tot}} \quad (3.23)$$

donde  $N_4$ ,  $N_3$ ,  $N_2$  y  $N_1$  son el número de pozos rodeado por otros cuatro, otros 3, otros 2 y con un solo BHE adyacente, respectivamente.  $\theta_8$  es el exceso de temperatura.

Para calcular las constantes de la ecuación 3.23, Fossa y Rolando (2015) consideraron diferentes configuraciones de pozos intercambiadores de calor (BHE), las cuales se resumen en la Tabla 3.4 donde se incluyen: configuraciones cuadradas, rectangulares, lineales, etc.

Las funciones  $g$  del modelo FLS se emplean para calcular los valores de penalización de temperatura. El análisis se enfoca en minimizar una función objetivo representativa del promedio de los valores absolutos de porcentaje de error ( $T_{p8}$  y  $T_p$ ):

$$F(a, b, c, d) = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \frac{|T_{pj} - T_{p8j}|}{T_{pj}} \quad (3.24)$$

donde  $k$  se refiere a las configuraciones rectangulares.

Tabla 3.4 Configuraciones de BHE (Fossa y Rolando, 2015)

	Cuadrado	Rectangular	Lineal	Configuración L	Configuración O	Configuración U
Arreglos de BHE	3x3 4x4 6x6 8x8 9x9 10x10 9x9 ( $H=150$ m) 9x9 ( $H=150$ m)	3x2 6x4 8x6 9x4 9x6 10x2 10x6 10x8	3x1 4x1 5x1 6x1 7x1 8x1 9x1 10x1	2x2L 4x4L 6x6L 8x4L 8x8L 10x4L 10x6L 10x10L	3x3O 4x4O 5x5O 6x6O 7x7O 8x8O 9x9O 10x10O	3x3U 4x4U 5x5U 6x6U 7x7U 8x8U 9x9U 10x10U
$B/H=0.03,0.0$ $5,0.075,0.1,0$ 125	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

### Análisis de resultados

Fossa y Rolando (2015) buscaron una forma de minimizar la función objetivo  $F$  de la ecuación 3.9 y encontraron que necesitaban una corrección en función del  $B/H$ . Asimismo, categorizaron las constantes y las configuraciones de pozos de la siguiente forma: “ $a$ ” pertenece a las configuraciones cuadradas y rectangulares (configuración R) y “ $b$ ” pertenece al resto de las configuraciones (configuración no R). Su análisis demostró que las configuraciones rectangulares delgadas (6x2, 10x2, etc) deben atribuirse a los arreglos en línea (configuración no R) para obtener resultados más favorables con relación a la penalización de la temperatura y el cálculo de la longitud total del campo de perforación. En la Tabla 3.5 se muestra el valor optimizado de las constantes de la ecuación 3.32 para su respectivo espaciado adimensional específico. En ambas configuraciones únicamente las constantes  $a$  y  $c$  se corrigen con la variación de  $B/H$  y las restantes no cambian.

Las configuraciones y la validación del modelo presentado por Fossa y Rolando (2015) se implementaron en 240 disposiciones geométricas de BHE. La Figura 3.7 muestra la longitud total calculada del BHE de acuerdo con los valores de la Tabla 3.5. En dicha figura, las longitudes más altas corresponden a campos BHE más grandes. Si se analizan a detalle los datos presentados en la Figura 3.7, se determina una diferencia porcentual promedio entre  $L$  y  $L_8$  del 2.7%. Este método se desarrolló para mantener el mismo esquema de la ASHRAE, estimar los valores de  $T_p$  y calcular las longitudes de los pozos. Se demostró que la desviación promedio de los valores  $T_{pA}$  es 54% mayor, lo cual afecta de manera directa al diseño del campo BHE reduciendo su longitud.

Tabla 3.5 Constantes a emplear en la ecuación. 3.23 para las configuraciones R y no R (Fossa y Rolando, 2015)

Configuración	Constante	$B/H$				
		0.03	0.05	0.075	0.1	0.125
Configuración R	A	5.410	3.900	3.070	2.420	1.930
	B	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280
	C	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
	D	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Configuración no R	A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	B	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950
	C	0.744	0.620	0.498	0.412	0.345
	D	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050

El método de Fossa y Rolando (2015) presenta desviaciones porcentuales de penalización de temperatura de aproximadamente 9%. El error se reduce cuando se trabaja con valores altos de  $T_p$  (campos grandes de BHE). Además, brinda buenas estimaciones de la longitud total, ya que la diferencia con el método de la ASHRAE es del 3%. A pesar de que utiliza pocas constantes, este método demostró ser más preciso y confiable que otros métodos publicados en la literatura internacional.

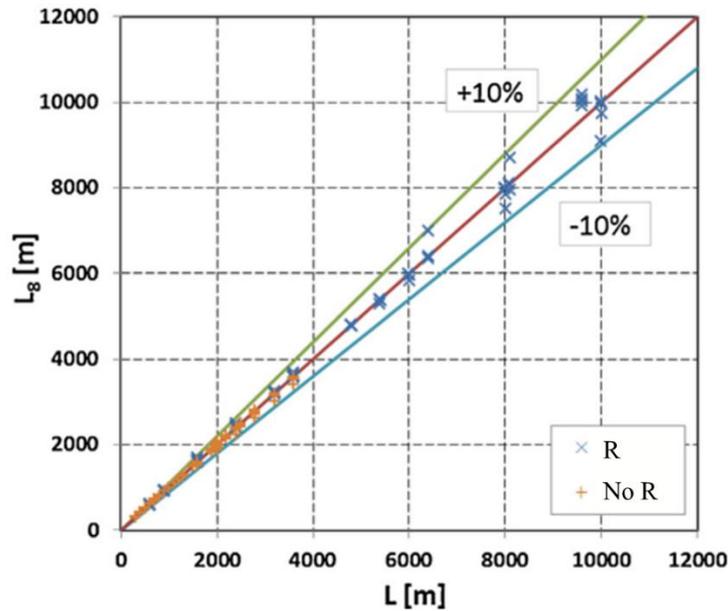


Figura 3.7 Longitud total ( $L$ ) calculada según el modelo  $T_p$  y el  $T_{p8}$  (Fossa y Rolando, 2015)

### 3.3.2.5 Propuesta de Bernier y Ahmadfard

Bernier y Ahmadfard (2018) proponen una modificación que se basa en la misma metodología de tres impulsos que la ecuación clásica de tamaño de la ASHRAE:

$$L = \frac{q_a R_{ga,g} + q_m R_{gm,g} + q_h R_{gh,g} + q_b R_b}{T_m - T_g} \quad (3.25)$$

Los tres pulsos del suelo,  $q_a$ ,  $q_m$  y  $q_h$  se aplican durante períodos iguales a 10 años ( $t_y$ ), 1 mes ( $t_m$ ) y 6 horas ( $t_h$ ). En esta alternativa, las resistencias térmicas del suelo se evalúan con base en el principio de superposición temporal de la ASHRAE (1995):

$$\begin{aligned} R_{ga,g} &= \left[ g(t_f) - g(t_f - t_1) \right] / 2\pi k_g \\ R_{gm,g} &= \left[ g(t_f - t_1) - g(t_f - t_2) \right] / 2\pi k_g \\ R_{gd,g} &= \left[ g(t_f - t_2) \right] / 2\pi k_g \end{aligned} \quad (3.26)$$

donde  $t_f = t_y + t_m + t_h$ ,  $t_2 = t_y + t_m$  y  $t_1 = t_y$ . El subíndice “g” representa las resistencias térmicas del suelo que se evalúan utilizando funciones g.

Bernier (2014) explica que las funciones g a largo plazo dependen de tres parámetros:  $r_b/H$ ,  $B/H$  y  $t/t_s$ . La principal desventaja de esta propuesta es que requiere de un procedimiento iterativo porque las funciones g dependen de la longitud desconocida del pozo. No obstante, Spitler y Malayapan (2013) afirman que la interpolación proporciona errores muy pequeños.

La Figura 3.8 muestra el procedimiento de cinco pasos del método iterativo. Primero, se debe seleccionar un valor estimado de  $L_i = (N_b * H_i)$ . Con este dato se evalúan tres funciones g en función de los valores de  $\ln(t/t_{s,i})$ ,  $r_b/H_i$  y  $B/H_i$  en los periodos  $t_f - t_2$ ,  $t_f - t_1$  y  $t_f$ . Posteriormente, las tres funciones g se usan para calcular las resistencias efectivas del suelo (ecuación 4.2) para después evaluar la longitud de pozo requerida,  $L_{ii}$  (ecuación 3.25). Esta longitud ( $L_{ii}$ ) se compara con la longitud anterior ( $L_i$ ) y si las dos longitudes concuerdan, dentro de cierta tolerancia ( $\epsilon$ ), entonces se dice que la solución converge. De lo contrario, la longitud  $L_{ii}$  se usa como valor inicial para la siguiente iteración.

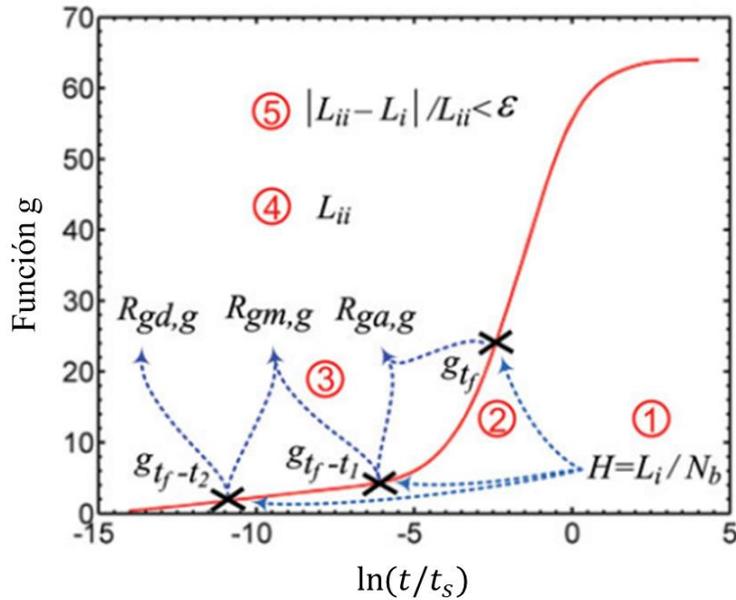


Figura 3.8 Procedimiento de los cinco pasos para el método iterativo (Bernier y Ahmadfard, 2018)

*Consideración de las funciones g*

El enfoque de Cimmino y Bernier (2013) se utiliza para determinar las funciones g en la escala de tiempo completo, el cual puede generar funciones g para cualquier geometría del campo de perforación y posteriormente dividirlos en segmentos para calcular la respuesta térmica de cada uno de ellos con una solución analítica.

En el proceso de generación de funciones g para una configuración de 3x2 cada pozo se subdivide en dos segmentos de la misma longitud ( $H_i = H/2$ ), dando un total de 12 segmentos que comparten la misma temperatura de la pared del pozo ( $T_b$ ). En este caso, la tasa de extracción de calor ( $Q_i$ ) se supone uniforme a lo largo de la longitud de cada segmento. Finalmente, la tasa total de extracción de calor por unidad de longitud ( $\bar{Q}$ ) de todos los pozos se considera fija y constante en el suelo. La Figura 3.9 representa las iteraciones térmicas de todos los segmentos hacia el segmento #1.

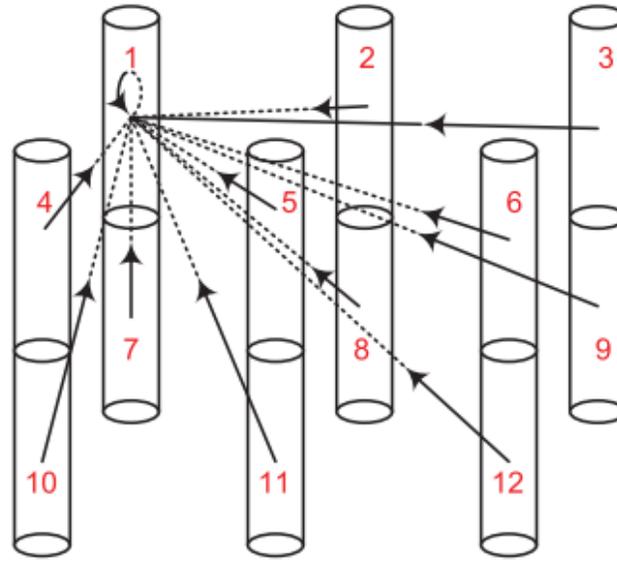


Figura 3.9 Esquema de la interacción térmica de todos los segmentos de pozos hacia el segmento #1 (Bernier y Ahmadfard, 2018)

Con el enfoque de Cimmino y Bernier (2013) se utiliza el modelo de FLS para evaluar las funciones  $g$  con una cierta tasa de extracción de calor ( $\bar{Q}$ ) en un determinado tiempo ( $t_k$ ) y la respuesta térmica ( $h_{i,j}(t_k)$ ) entre los 12 segmentos. La ecuación matemática que describe dicho enfoque es:

$$h_{i,j}(t_k) = \frac{1}{2} \int_{1/\sqrt{4\alpha_g t_k}}^{\infty} \exp(-r_{i,j}^2 s^2) \frac{Y(H_s S, D_i S, D_j S)}{H_j S^2} ds \quad (3.27)$$

donde  $H_s$  son las longitudes de los segmentos,  $D_i$  y  $D_j$  son las profundidades de los segmentos del pozo  $i$  y  $j$  desde la superficie del suelo y  $r_{i,j}$  es la distancia radial entre los segmentos  $i$  y  $j$ .

La distancia radial de segmentos ubicados en el mismo pozo es igual a  $r_b$ . Los valores de respuesta térmica se pueden reorganizar en una matriz cuadrada de 12x12 como:

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \dots & h_{11,1} & h_{12,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} & \dots & h_{11,2} & h_{12,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{1,11} & h_{2,11} & \dots & h_{11,11} & h_{12,11} \\ h_{1,12} & h_{2,12} & \dots & h_{11,12} & h_{12,12} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

El factor de respuesta térmica de segmento a segmento (ecuación 3.27) debe multiplicarse por la tasa de extracción de calor adimensional de cada segmento. Para un segmento  $j$  típico, se aplica la siguiente expresión:

$$h_{1,j}\widetilde{Q}_1(t_k) + h_{2,j}\widetilde{Q}_2(t_k) + \dots + h_{11,j}\widetilde{Q}_{11}(t_k) + h_{12,j}\widetilde{Q}_{12}(t_k) + \theta^*_{b,j}(t_k) = \theta_b(t_k) \quad (3.29)$$

donde  $\theta_b(t_k)$  es la variación de temperatura adimensional en la pared del pozo (es la misma para todos los segmentos) en el tiempo  $t_k$  y la función  $g$ .  $\theta^*_{b,j}(t_k)$  es un término que explica el efecto histórico de la variación temporal de las tasas de extracción de calor. Este término fue determinado por Cimmino y Bernier (2013) y se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$\theta^*_{b,j}(t_k) = \left[ \sum_{p=1}^{k-1} \sum_{i=1}^{N_b \cdot N_s = 12} h_{i,j}(t_k - t_{p-1}) \tilde{q}_i(t_p) \right] - h_{i,j}(t_k - t_{k-1}) \tilde{Q}_i(t_{k-1}) \quad (3.30)$$

donde  $\tilde{q}_i(t_p)$  es igual a  $\tilde{Q}_i(t_p) - \tilde{Q}_i(t_{p-1})$  y  $p$  es el contador de pasos de tiempo.

La última ecuación para solucionar el problema de las tasas de calor desconocidas se basa en el hecho de que la tasa de calor total es constante:

$$\sum_{i=1}^{N_b \cdot N_s = 12} \tilde{Q}_i(t_k) = N_b * N_s \quad (3.31)$$

Finalmente, el sistema de ecuaciones se puede expresar con la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \dots & h_{11,1} & h_{12,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} & \dots & h_{11,2} & h_{12,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{1,11} & h_{2,11} & \dots & h_{11,11} & h_{12,11} \\ h_{1,12} & h_{2,12} & \dots & h_{11,12} & h_{12,12} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$X \begin{bmatrix} \tilde{Q}_1(t_k) \\ \tilde{Q}_2(t_k) \\ \vdots \\ \tilde{Q}_{11}(t_k) \\ \tilde{Q}_{12}(t_k) \\ \theta_b(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{b,1}^* \\ \theta_{b,2}^* \\ \vdots \\ \theta_{b,11}^* \\ \theta_{b,12}^* \\ N_b \cdot N_s = 12 \end{bmatrix}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, se obtienen las 12 extracciones de calor ( $\tilde{Q}_i(t_k)$ ) y la función  $g(\theta_b(t_k))$  en el tiempo  $t_k$ . La ecuación 3.32 es el sistema de ecuaciones resultante para la configuración 3x2 y el tiempo de análisis aumenta proporcionalmente al número y segmento de pozos. Además, la generación de funciones  $g$  sin superposición temporal reduce significativamente el tiempo de cálculo, lo cual es un aspecto importante para el método alternativo propuesto.

*Verificación del método propuesto por Bernier y Ahmadvard (2018)*

La Figura 3.10 muestra el perfil de carga del suelo obtenido con el método propuesto por Bernier y Ahmadvard (2018). Las cargas negativas indican que el edificio está modo de calefacción, recolectando calor del suelo durante un ciclo de 10 años. La Tabla 3.6 presenta un resumen mensual de este perfil de carga. Se observa que, las cagas de cada mes ( $q_m$ ) se evalúan con base en el promedio de todas las cargas por hora de ese mes, incluyendo los picos de calefacción ( $q_{h,h}$ ) y refrigeración ( $q_{h,c}$ ). Considerando que la carga máxima de calefacción (-443.9 kW) es mayor que la carga máxima de refrigeración (345.5 kW) y que existe un desequilibrio térmico negativo, la longitud del campo de perforación requerida se determina cuando el edificio está en modo de calefacción máxima. Las cargas del suelo que se utilizan para los tres métodos de pulso se presentan en la Tabla 3.7 y los parámetros del pozo y las propiedades del suelo en la Tabla 3.8. Estas cargas se utilizan para seis configuraciones diferentes de pozos que se muestran en la primera fila de la Tabla 3.9.

Tabla 3.6 Cargas máximas y medias mensuales del suelo en refrigeración y calefacción (Bernier y Ahmadvard, 2018)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$q_m$ (kW)	-146.4	-144.7	-123.0	-74.5	-17.6	31.0	41.9	30.6	-14.5	-62.3	-98.1	-136
$q_{h,c}$ (kW)	0.0	0.0	0.0	30.5	225.1	304.4	345.5	323.1	231.5	201.4	0.0	0.0
$q_{h,h}$ (kW)	443.9	-428.0	-362.4	-309.2	-186.2	-108.9	-70.2	-170.1	-228.1	-297.2	-383.7	-415.8

Tabla 3.7 Carga anual, mensual y horaria utilizada para el método de los tres pulsos (Bernier y Ahmadfard, 2018)

Cargas del suelo	(KW)
$q_h$	-443.9
$q_m$	-146.4
$q_a$	-59.0

Con base en las condiciones mostradas en la Tabla 3.8 y la Figura 3.10, se determina que se requieren 120 pozos (12x10) con una longitud de 100 m cada uno. Esta configuración representa el caso base (quinta columna de la Tabla 3.9). Sin embargo, otros casos de prueba utilizan un perfil de carga que es proporcional al número de perforaciones. Por ejemplo, un resultado de 25 perforaciones tiene valores de  $q_a$ ,  $q_m$  y  $q_h$  correspondientes a 25/120 veces el valor de las Tablas 3.6 y 3.7.

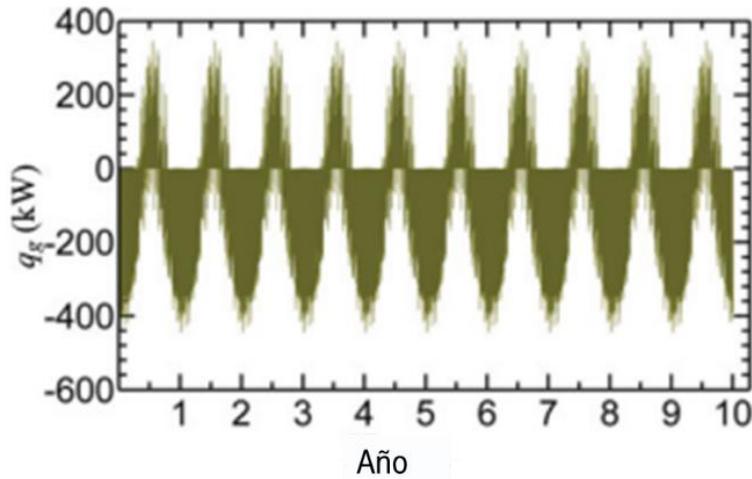


Figura 3.10 Perfil de Carga del suelo (Bernier y Ahmadfard, 2018)

Bernier y Ahmadfard (2018) compararon su método propuesto con otros métodos de dimensionamiento que no contemplan los efectos a corto plazo. Uno de ellos es la herramienta de dimensionamiento Earth Energy Designer (EED) (Blomberg *et al.*, 2015), la cual utiliza funciones  $g$  precalculadas para dimensionar los campos de perforación y requiere las cargas de calefacción y refrigeración mensuales. Los siguientes dos métodos de dimensionamiento usan la ecuación de la ASHRAE, pero con las metodologías de Bernier *et al.* (2008) y Fossa y Rolando (2013). Con base en la Tabla 3.9 se observa que el método propuesto por Bernier y Ahmadfard (2018) tiene una diferencia de aproximadamente 2.9% respecto a los otros métodos de dimensionamiento.

Tabla 3.8 Parámetros del pozo y propiedades térmicas del suelo (Bernier y Ahmadfard, 2018)

Parámetro	Valor
<b>Suelo</b>	
Conductividad térmica del suelo ( $k_g$ )	$1.8 \text{ W}^*(\text{m}^*\text{K})^{-1}$
Difusividad térmica del suelo ( $a_g$ )	$0.075 \text{ m}^2*\text{día}^{-1}$
Temperatura del suelo sin perturbaciones ( $T_g$ )	$18^\circ\text{C}$
<b>Campo de perforación</b>	
Profundidad del pozo ( $D$ )	$4 \text{ m}$
Distancia entre pozos ( $B$ )	$6.5 \text{ m}$
<b>Pozo</b>	
Radio de perforación ( $r_b$ )	$75 \text{ mm}$
Número de tuberías	$2$
Radio exterior de la tubería ( $r_{p,out}$ )	$16.7 \text{ mm}$
Radio interior de la tubería ( $r_{p,in}$ )	$13 \text{ mm}$
Distancia de centro a centro de las tuberías ( $d_p$ )	$62 \text{ mm}$
Conductividad térmica de la tubería ( $k_p$ )	$0.4 \text{ W}^*(\text{m}^*\text{K})^{-1}$
Capacidad calorífica volumétrica de la tubería	$1540 \text{ kJ}^*(\text{m}^3*\text{K})^{-1}$
Conductividad térmica de la lechada ( $k_{gr}$ )	$1 \text{ W}^*(\text{m}^*\text{K})^{-1}$
Capacidad calorífica volumétrica de la lechada	$3900 \text{ kJ}^*(\text{m}^3*\text{K})^{-1}$
Resistencia de contacto ( $R_c$ )	$0 \text{ W}^*(\text{m}^*\text{K})^{-1}$
Resistencia térmica del pozo resultante ( $R_b$ )	$0.20 \text{ m}^*\text{k}^*\text{W}^{-1}$
<b>Fluido</b>	
Viscosidad del fluido ( $\mu_f$ )	$0.00179 \text{ kg}^*(\text{m}^*\text{s})^{-1}$
Densidad del fluido ( $\rho_f$ )	$1016 \text{ kg}(\text{m}^3)^{-1}$
Capacidad calorífica del fluido ( $C$ )	$4000 \text{ J}^*(\text{kg}^*\text{K}^{-1})$
Conductividad térmica del fluido ( $k_f$ )	$0.513 \text{ W}^*(\text{m}^*\text{K})^{-1}$
Caudal del fluido ( $\dot{m}$ )	$0.043 \text{ kg}^*\text{s}^{-1} \text{ por kW}$
Límite mínimo de temperatura del fluido de entrada ( $T_L$ )	$0^\circ\text{C}$
Coefficiente de convección ( $h_{conv}$ )	$1000 \text{ W}^*(\text{m}^2*\text{K})^{-1}$

Tabla 3.9 Comparación entre el método propuesto y otras cuatro herramientas de dimensionamiento  
(Bernier y Ahmadfard, 2018)

Geometría del campo de perforación						
	19: (9,1,9)	25: (1 × 25)	28: (9,1,8,1, 9)	36: (8,1,8,1,8,1,8,1)	120: (12 × 10)	127: <b>Simétrico</b>
Longitud del pozo (m)						
(Diferencia porcentual con respecto al método propuesto sin superposición temporal)						
Método propuesto sin superposición temporal	77.0	76.8	77.6	78.9	106.1	112.6
Método propuesto con superposición temporal	77.1 (0.1)	76.9 (0.1)	77.7 (0.1)	80.0 (0.1)	107.4 (1.2)	114.1 (1.3)
EED	79.8 (3.7)	77.4 (0.9)	77.2 (0.5)	78.1 (1.0)	111.6 (5.2)	_____
Ecuación clásica de la ASHRAE de Fossa y Rolando (2013)	78.9 (2.6)	78.7 (2.6)	79.5 (2.6)	80.9 (2.5)	108.6 (2.3)	115.2 (2.3)
Ecuación clásica de la ASHRAE de Bernier (2008)	79.6 (3.4)	79.4 (3.4)	80.2 (3.4)	81.5 (3.4)	109.1 (2.8)	115.7 (2.7)



## **4 EVALUACIÓN DE PROPUESTAS PARA MEJORAR LA METODOLOGÍA DE LA ASHRAE**

### **4.1 Consideraciones generales**

#### **4.1.1 Localización del sitio de estudio**

Los pozos simulados para evaluar las propuestas de mejora de la metodología ASHRAE se localizan en la alcaldía Miguel Hidalgo, al poniente de la Ciudad de México. De acuerdo con la Zonificación Geotécnica presentada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2017) se encuentran en la Zona I de Lomas (Figura 4.1).

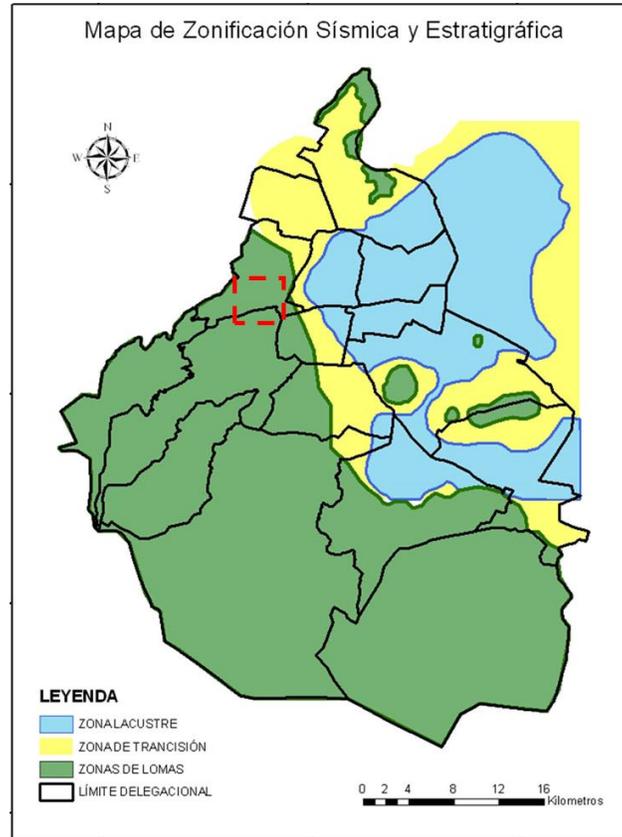


Figura 4.1 Zonificación de la CDMX y ubicación del proyecto (UNAM, 2015)

#### 4.1.2 Geología

La geología de la zona consta de suelo aluvial, depósitos piroclásticos y lacustres en las partes bajas y rocas ígneas en las zonas altas de la alcaldía (Proyeco, 2021). Un estudio solicitado por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Proyeco, 2021) demostró que el 87% del territorio de la alcaldía corresponde a un suelo de origen ígneo y el 13% restante corresponde a roca ígnea extrusiva.

Por otra parte, el terreno posee un sustrato firme depositado fuera de la zona lacustre, el 87% del territorio corresponde a suelo y el 14% restante a ígnea extrusiva donde se encuentran las famosas colonias Bosques de las Lomas, Lomas Altas y una parte de la Tercera Sección del Bosque de Chapultepec (Proyeco, 2021).

#### 4.1.3 Estratigrafía del sitio

López *et al.* (2022) establecen que la estratigrafía del lugar consta de seis capas (Figura 4.2): El estrato superior (RE) es material de relleno y tiene un espesor de 0.6 m. A continuación, se localiza una capa de arena limosa (AL) de 6.5 metros de profundidad. Posteriormente, se encuentra una capa de 1.5 m de espesor de grava mal graduada. Enseguida se localiza una capa de arena grava limosa

con arena (GL) de 3.5 m de espesor. Por debajo, se extiende un estrato de arena mal graduada (AR) hasta 16 m de profundidad y la última capa (RQ) está formada por fragmentos de roca andesítica.

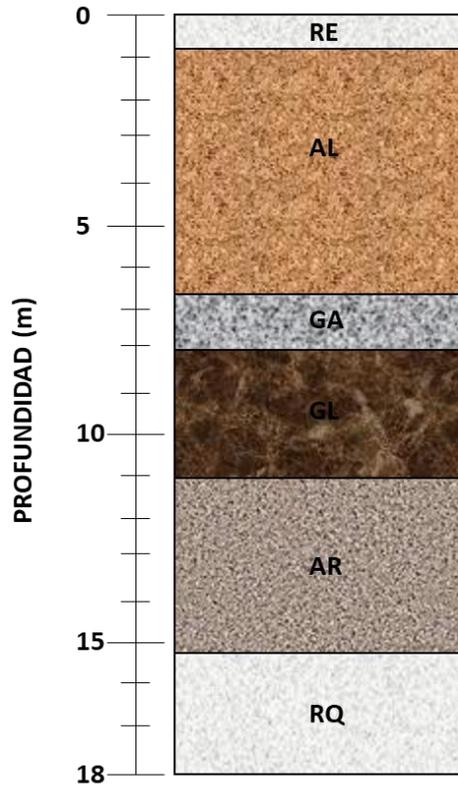


Figura 4.2 Perfil estratigráfico del sitio (López *et al.*, 2022)

#### 4.1.4 Estudios de las propiedades térmicas del sitio

En el diseño térmico de pozos intercambiadores de calor, es importante conocer la energía máxima que los elementos pueden suministrar a la edificación. Para ello, se requieren conocer las propiedades térmicas del suelo entre las que se encuentran la conductividad térmica, la temperatura inalterada del suelo y la resistencia térmica (Gehlin, 2002). Los Ensayos de Respuesta Térmica (TRT, por sus siglas en inglés) son pruebas *in situ* que permiten determinar estas propiedades. Al ejecutar un TRT se hace circular un fluido portador de calor dentro de la tubería en U que se instala dentro del pozo y se monitorean los cambios de temperatura producidos (Franco *et al.*, 2016).

En el 2021, se realizó un ensayo TRT al poniente de la Ciudad de México como parte del primer proyecto de pilas de energía en México a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 4.3). La Tabla 4.1 presenta los resultados que se obtuvieron al realizar esta prueba.



Figura 4.3 Equipo TRT- IIUNAM (López *et al.*, 2022)

Tabla 4.1 Resultados de la prueba TRT (López *et al.*, 2022)

Parámetro	Valor
Temperatura media del suelo ( $T_m$ )	18.8 °C
Resistencia térmica de las tuberías ( $R_p$ )	0.12 m°C W <sup>-1</sup>
Conductividad térmica del suelo ( $\square$ )	1.63 W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Resistencia del concreto ( $R_c$ )	0.078 m°C W <sup>-1</sup>
Resistencia térmica de la pila de energía ( $R_b$ )	0.09 m°C W <sup>-1</sup>

## 4.2 Cargas térmicas

Para determinar el funcionamiento óptimo de las estructuras termoactivas, es necesario conocer la temperatura ambiente del sitio de operación. Con base en los datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020) se determinó que la temperatura media del sitio es de 15.2°C, la temperatura máxima promedio es de 27.4°C y la mínima es de 5.1°C (Figura 4.4). López *et al.* (2022) sugieren proveer principalmente calor a la edificación.

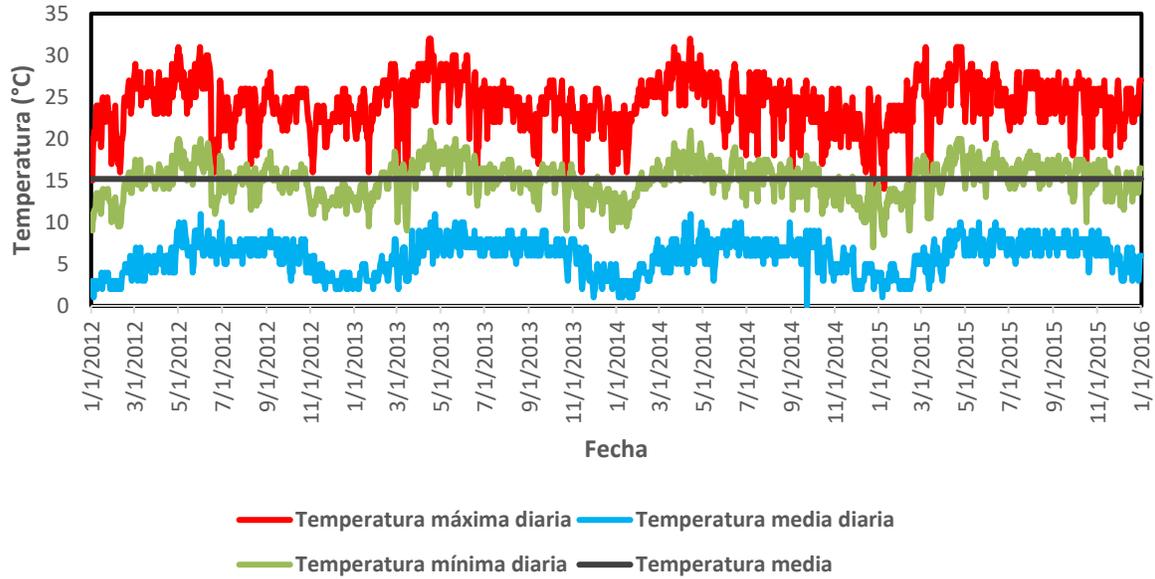


Figura 4.4 Temperatura ambiente del sitio de estudio (López *et al.*, 2022)

El consultor energético efectuó diversas simulaciones numéricas las cuales indican que la demanda energética del lugar se concentra entre los meses de noviembre a febrero y se estima que la carga térmica máxima es de 22.8 kW con un promedio anual de 2.1 kW (López *et al.*, 2022) (Figura 4.5).

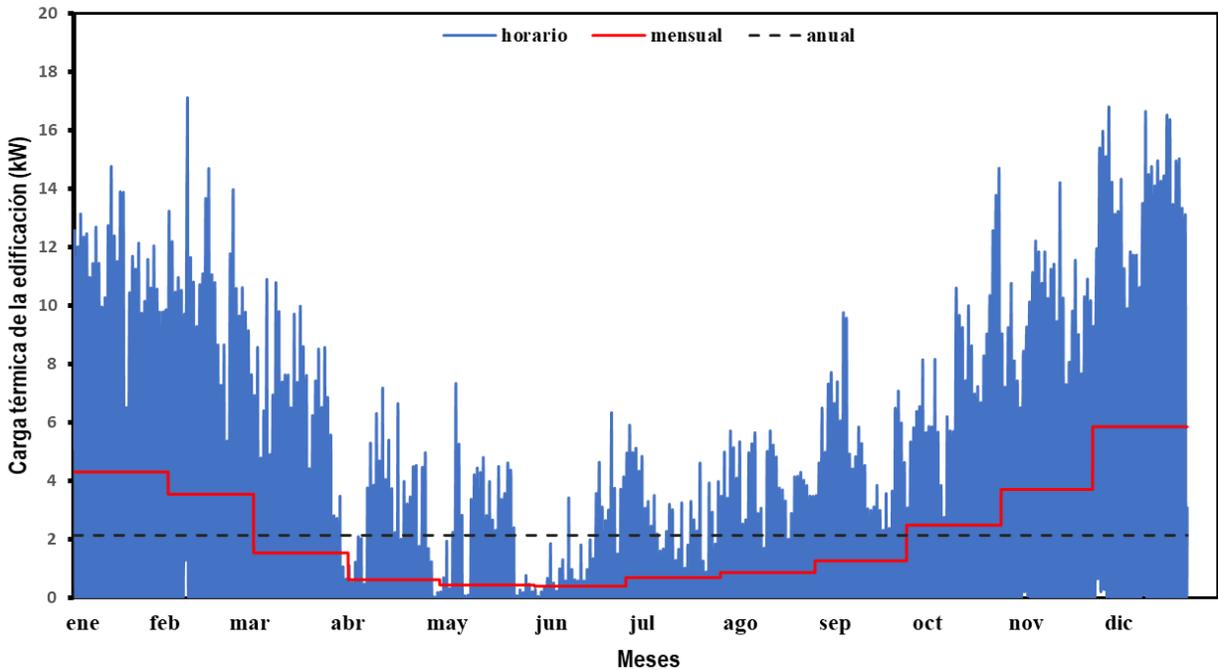


Figura 4.5 Cargas térmicas del proyecto (López *et al.*, 2022)

### 4.3 Parámetros iniciales

La tabla 4.2 presenta los parámetros iniciales considerados para el diseño de los pozos intercambiadores de calor.

Tabla 4.2 Parámetros iniciales

Parámetro	Valor
<b>Suelo</b>	
Conductividad térmica del suelo	1.6 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Difusividad térmica del suelo	1.4x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Temperatura inicial	18.8 °C
<b>Bomba de calor</b>	
COP	4
Temperatura de entrada ELT	1.8 °C
Temperatura de salida LWT	5.0 °C
<b>Relleno (cemento con bentonita)</b>	
Conductividad térmica	1.5 Wm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Difusividad térmica	1.16x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
<b>Tuberías PEAD</b>	
Conductividad térmica de tuberías	0.45 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Radio externo	0.0167 m
Radio interno	0.0127 m
Número de tuberías	2

Los pozos intercambiadores de calor se consideraron con un diámetro de 10.16 cm y una tubería cuyo radio externo es de 0.0167 m y el interno de 0.0127 m (Figura 4.6). Para poder evaluar las propuestas de mejora de la metodología de la ASHRAE se optaron por dos distribuciones distintas para los pozos intercambiadores de calor: (1) 12 pozos con una profundidad de 30 m y separación de 8 m entre cada pozo, (2) 6 pozos de 70 m de profundidad y separación de 7 m entre pozos (Anexo I). La principal diferencia entre ambos diseños es la profundidad de cada pozo, el objetivo principal consiste en evaluar la variación de la temperatura de penalización ( $T_p$ ) con diferentes profundidades y configuraciones. Otro aspecto importante es la cantidad de elementos en cada propuesta, ya que este número se encuentra asociado a la profundidad de cada pozo y la longitud total inicial (sin  $T_p$ ) obtenida con el método de la ASHRAE.

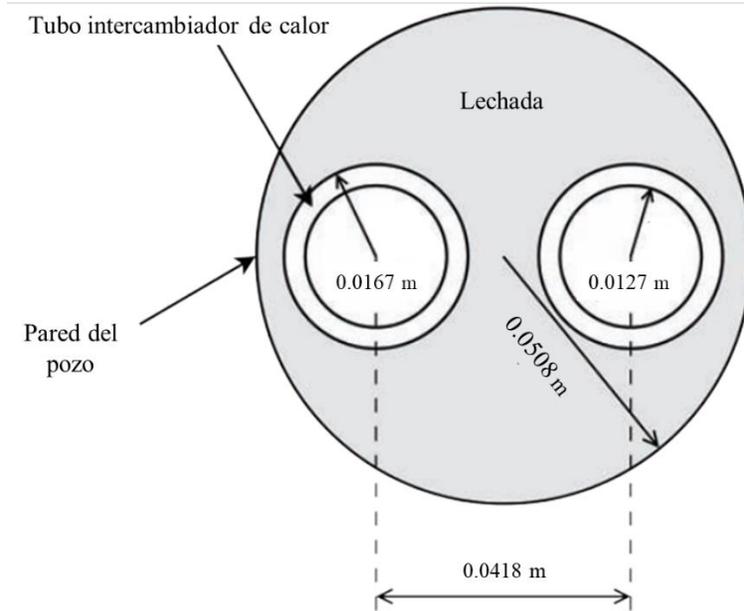


Figura 4.6 Diseño del pozo intercambiador de calor

#### 4.4 Presentación y análisis de resultados

Con los parámetros iniciales considerados para el diseño de los pozos intercambiadores de calor (Tabla 4.2) se obtuvo una longitud inicial requerida de 387.44 m, sin considerar la temperatura de penalización ( $T_p$ ). En la Tabla 4.3 se observa que la mayor temperatura de penalización ( $T_p$ ) para las configuraciones de 6 pozos fue de 4.04 °C con el método de la ASHRAE y la mayor longitud requerida fue de 529.75 m para el mismo método (Tabla 4.5). Para las configuraciones de 12 pozos intercambiadores de calor, la Tabla 4.4 muestra que el valor máximo de  $T_p$  fue de 3.8 °C y se obtuvo una longitud total de 517.74 m (Tabla 4.6).

Tabla 4.3 Temperaturas de penalización para las configuraciones con 6 pozos

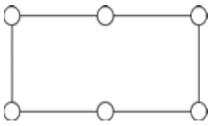
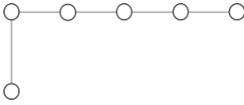
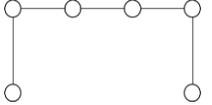
Geometría del campo de perforación para 6 pozos	Temperatura de penalización (°C)		
			
Método de Fossa	2.0	1.47	1.58
Método de la ASHRAE	4.04	3.35	3.35
Método de Capozza	2.13	1.69	1.79
Método de Fossa & Rolando	2.13	1.68	1.68
Método de Philippe & Bernier	2.29	2.13	2.21

Tabla 4.4 Temperaturas de penalización para las configuraciones con 12 pozos

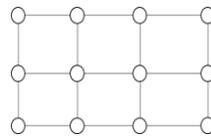
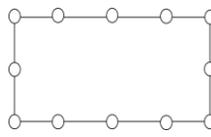
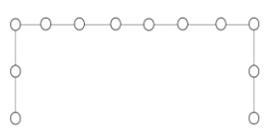
Geometría del campo de perforación para 12 pozos	Temperatura de penalización (°C)		
			
Método de Fossa	1.79	1.22	0.74
Método de la ASHRAE	3.88	3.70	2.94
Método de Capozza	2.94	2.43	1.85

Tabla 4.5 Longitud total para las configuraciones con 6 pozos

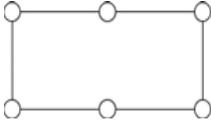
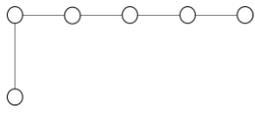
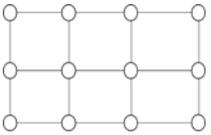
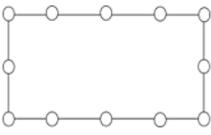
Geometría del campo de perforación para 6 pozos	Longitud total requerida (m)		
			
Método de Fossa	446.0	429.11	432.62
Método de la ASHRAE	529.75	495.23	495.25
Método de Capozza	449.84	435.28	438.47
Método de Philippe & Bernier	454.96	449.78	452.42
Método de Fossa & Rolando	421.90	408.00	408.00
Método de Ahmadfard & Bernier	424.64	410.38	413.48

Tabla 4.6 Longitud total para las configuraciones con 12 pozos

Geometría del campo de perforación para 12 pozos	Longitud total requerida (m)		
			
Método de Fossa	439.3	421.58	407.81
Método de la ASHRAE	517.74	509.93	478.7
Método de Capozza	478.85	459.88	440.25
Método de Ahmadfard & Bernier	406.65	395.41	385.67

En los análisis se normalizaron los resultados anteriores respecto al método de propuesto por Fossa (2011) ya que proporciona la base del método de la ASHRAE (2014) y contempla la solución de Fuente Lineal Finita en su técnica de superposición espacial para simular el comportamiento de diferentes configuraciones de pozos intercambiadores de calor (Fossa, 2011).

La Figura 4.7 muestra la comparación de la temperatura de penalización ( $T_p$ ) calculada con el método clásico de la ASHRAE (2014) y el método de Fossa (2011). Se observa que, en ambas configuraciones de pozos la  $T_p$  incrementa un 100% respecto a los valores de referencia, siendo el valor máximo 4.04 °C para la configuración 1 con 6 pozos.

En la Figura 4.8 se muestra un análisis comparativo entre el Método de Fossa (2011) y Capozza (2012). El método de Capozza (2012) presentó valores superiores en un 20% para las configuraciones de 12 pozos y de 10% para las configuraciones de 6 pozos. La temperatura de penalización ( $T_p$ ) que exhibe una diferencia menor respecto a los valores de referencia fue la configuración 1 de 6 pozos con 2.13 °C.

En la Figura 4.9 se presenta el método de Philippe y Bernier (2010), aplicado únicamente a las configuraciones de 6 pozos debido a las restricciones que contempla. Con este método se obtuvieron temperaturas que exceden aproximadamente un 20% respecto a las de referencia, siendo nuevamente la configuración 1 la que presentó una variación menor.

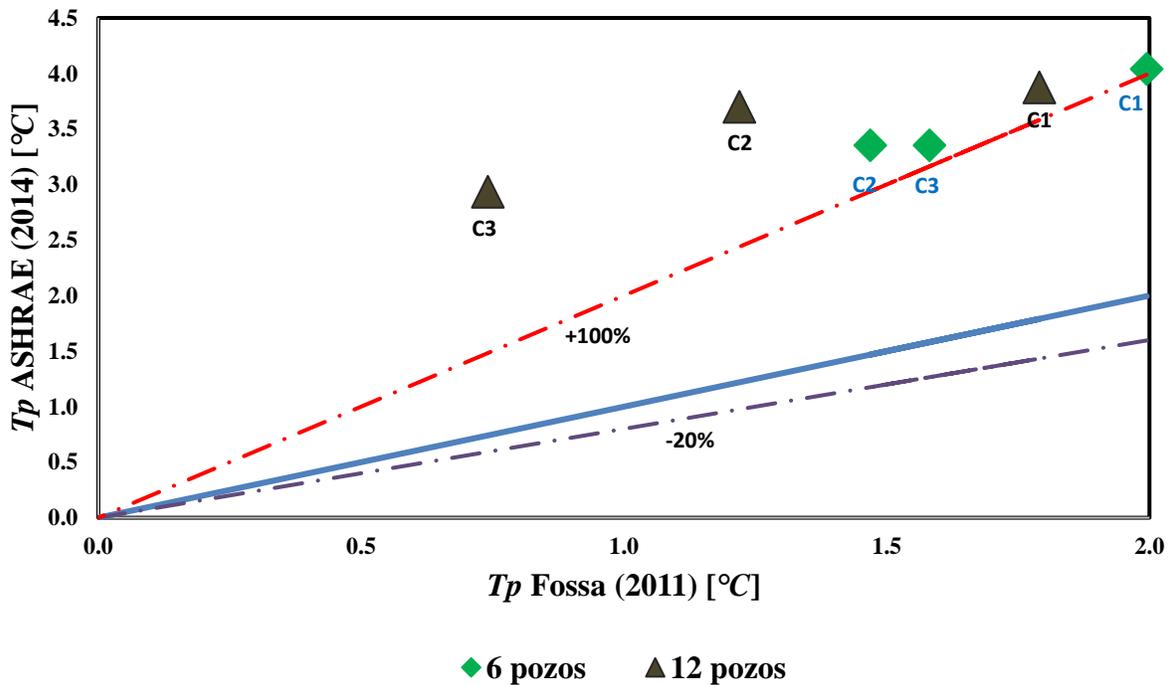


Figura 4.7 Temperatura de penalización ( $T_p$ ) calculada con el método de la ASHRAE (2014) y el método de Fossa (2011)

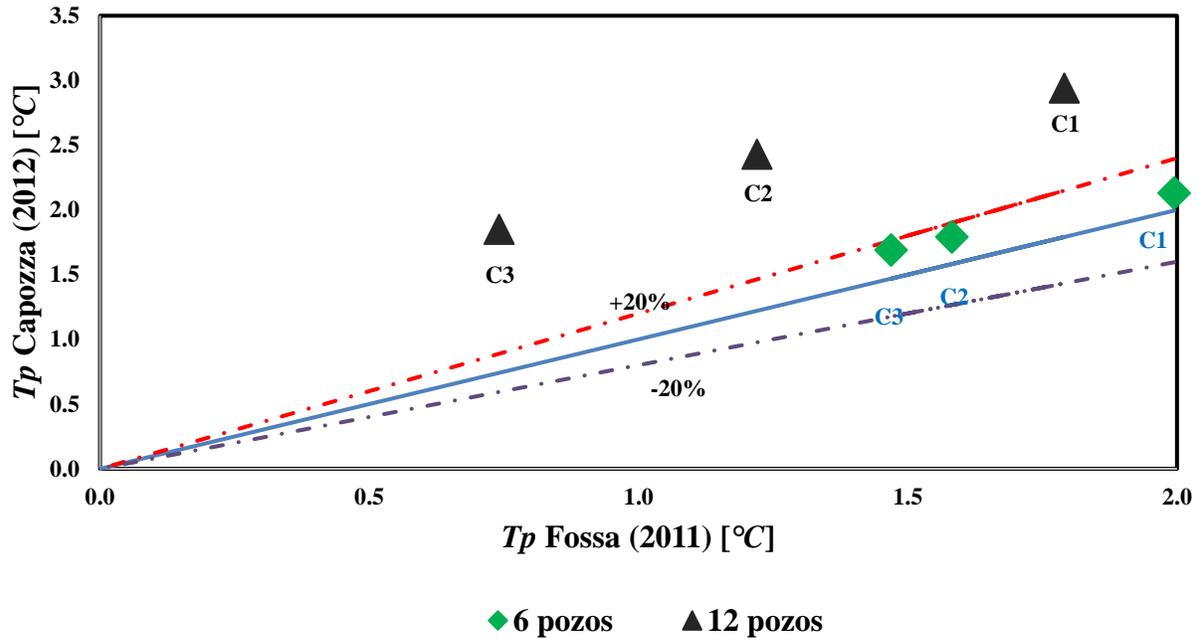


Figura 4.8 Temperatura de penalización ( $T_p$ ) calculada con el método de Capozza (2012) y el método de Fossa (2011)

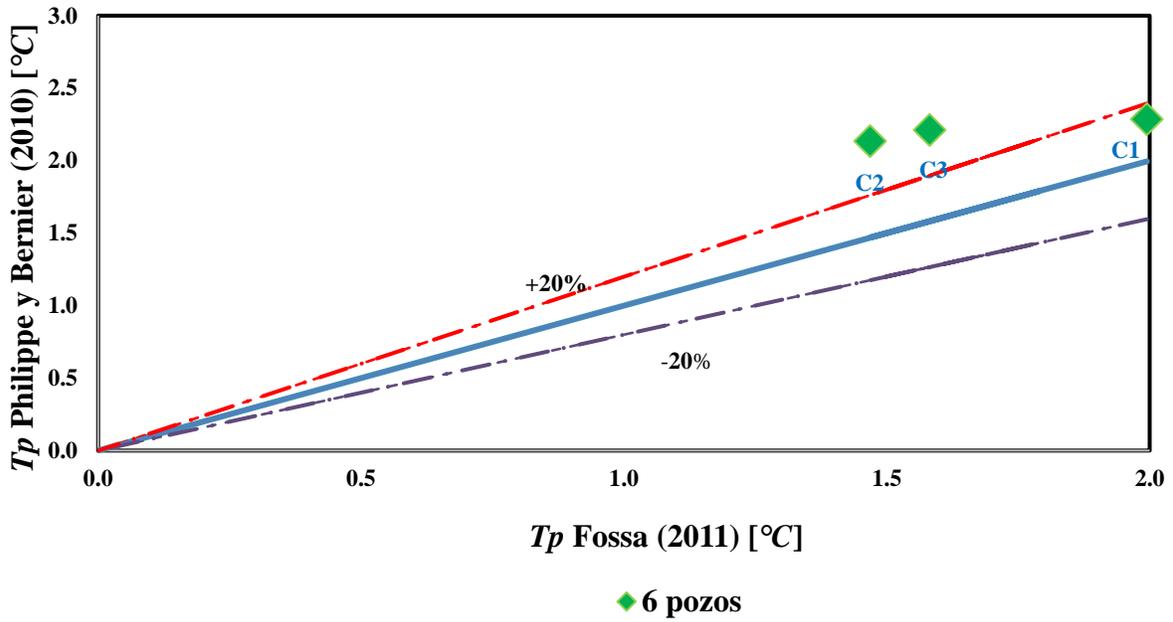


Figura 4.9 Temperatura de penalización ( $T_p$ ) calculada con el método de Philippe & Bernier (2010) y el método de Fossa (2011)

En la Figura 4.10 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos con la propuesta de Fossa y Rolando (2015) y la propuesta de Fossa (2011). Para el método de Fossa y Rolando (2015) se obtuvieron temperaturas que sobreestiman aproximadamente el 10% respecto a los valores de referencia del método de Fossa (2011). Entre las cuatro metodologías analizadas, este modelo es el que presentó una diferencia menor, ya que también se consideró el principio de superposición espacial. La configuración que exhibió una diferencia menor fue la tercera, que consiste en 6 pozos con 1.68 °C (+0.10 °C respecto al valor de referencia). Una vez que se obtuvieron las temperaturas de penalización ( $T_p$ ) de cada propuesta, se calculó la longitud total para calentamiento ( $L_h$ ), las cuales se muestran en las Tablas 4.5 y 4.6.

En la Figura 4.11 se muestra el análisis entre las longitudes obtenidas con el método tradicional de la ASHRAE (2014) y el método de Fossa (2011). Se observa que, el método de la ASHRAE (2015) sobrestima aproximadamente 20% la longitud calculada con el método de Fossa (2011) tanto en las propuestas con 6 pozos como en las de 12 pozos. La configuración que presentó una menor diferencia fue la configuración 3 con 12 pozos, dando una longitud de 478.7 m.

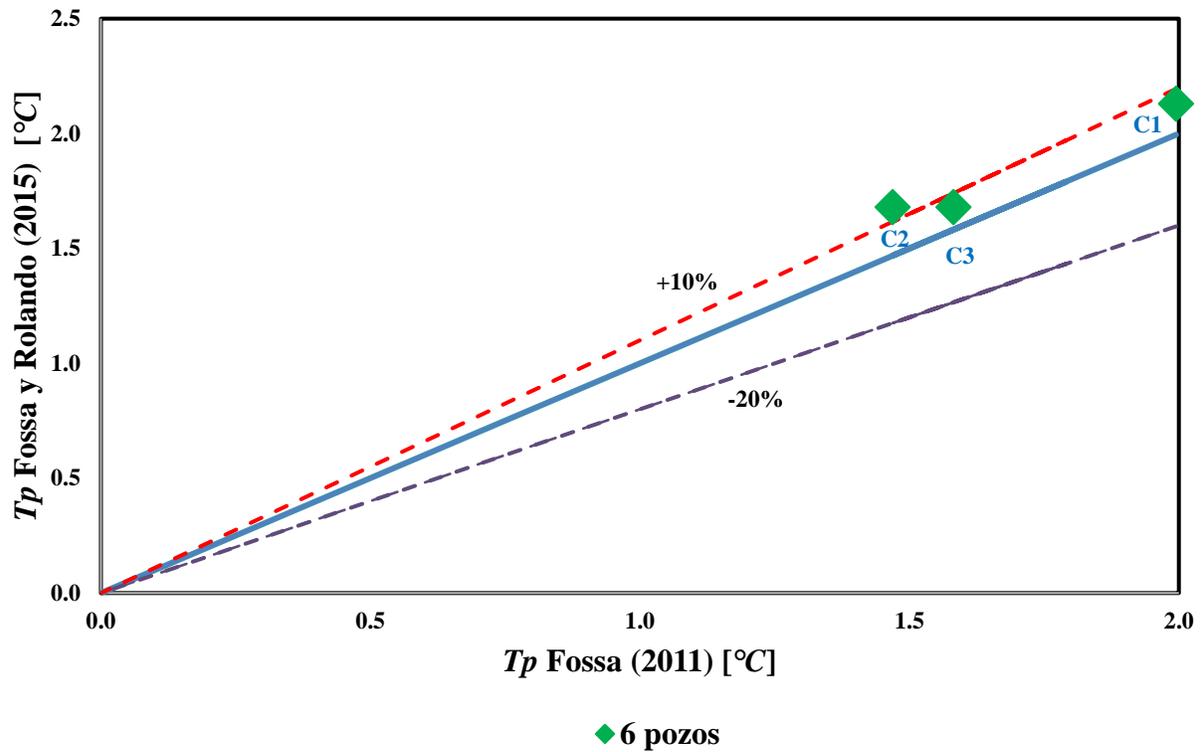


Figura 4.10 Temperatura de penalización ( $T_p$ ) calculada con el método de Fossa & Rolando (2015) y el método de Fossa (2011)

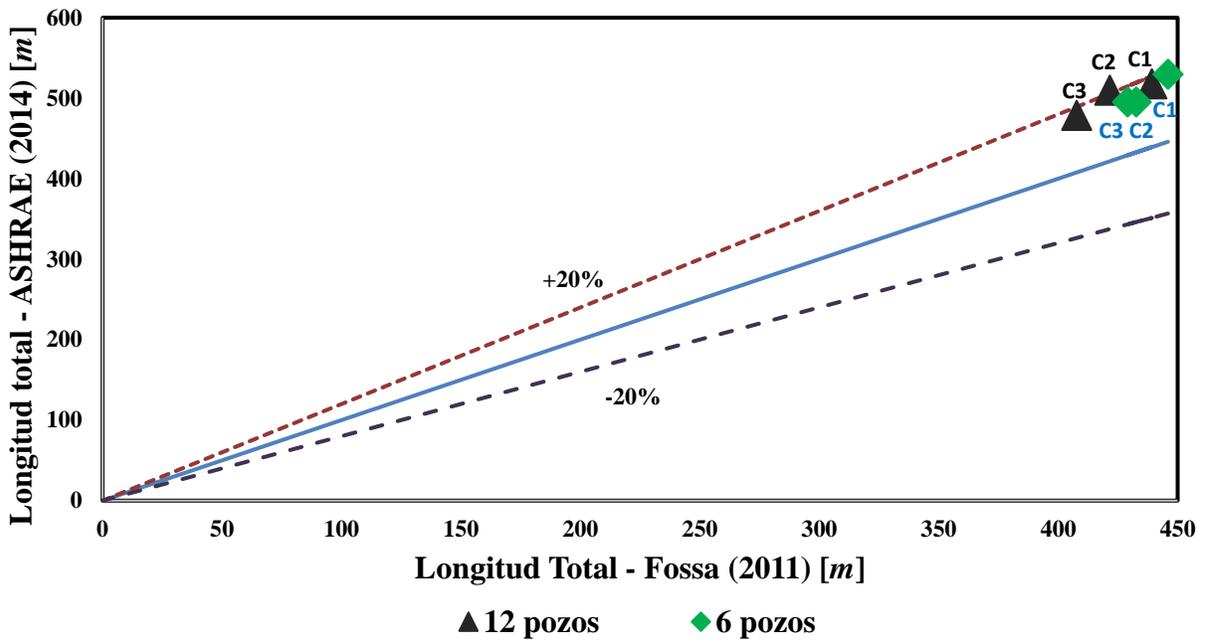


Figura 4.11 Longitud total calculada con el método de la ASHRAE (2014) y el método de Fossa (2015)

En la Figura 4.12 se presenta la comparación entre las longitudes obtenidas con el método de Capozza (2012) y Fossa (2011). Con el método de Capozza (2012) se obtuvieron resultados bastante favorables, ya que las configuraciones de 6 pozos presentaron una diferencia del 1% respecto a las longitudes calculadas con el método de Fossa (2011). Las configuraciones de 12 pozos también mostraron una buena correlación, ya que ninguna de ellas sobreestimó más del 10% a los valores de referencia.

En la Figura 4.13 se muestran las longitudes obtenidas con el método de Philippe y Bernier, las cuales son muy parecidas a las de referencia (varían menos del 10%), siendo la configuración 1 la que presenta mayor similitud.

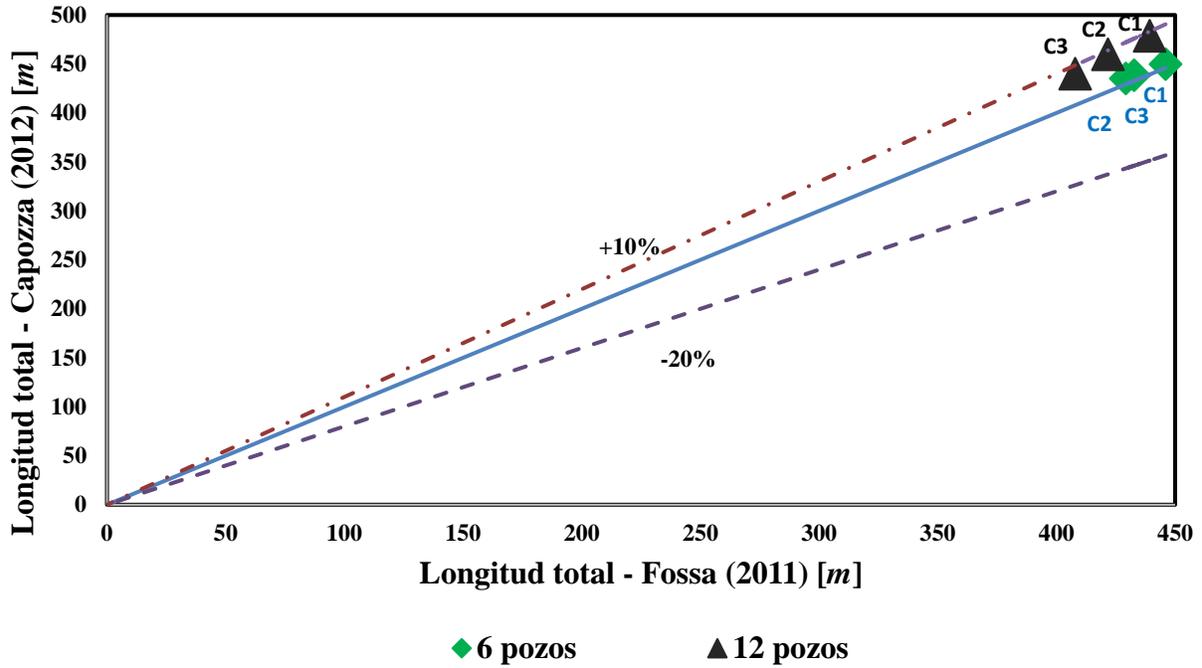


Figura 4.12 Longitud total calculada con el método de Capozza (2012) y el método de Fossa (2011)

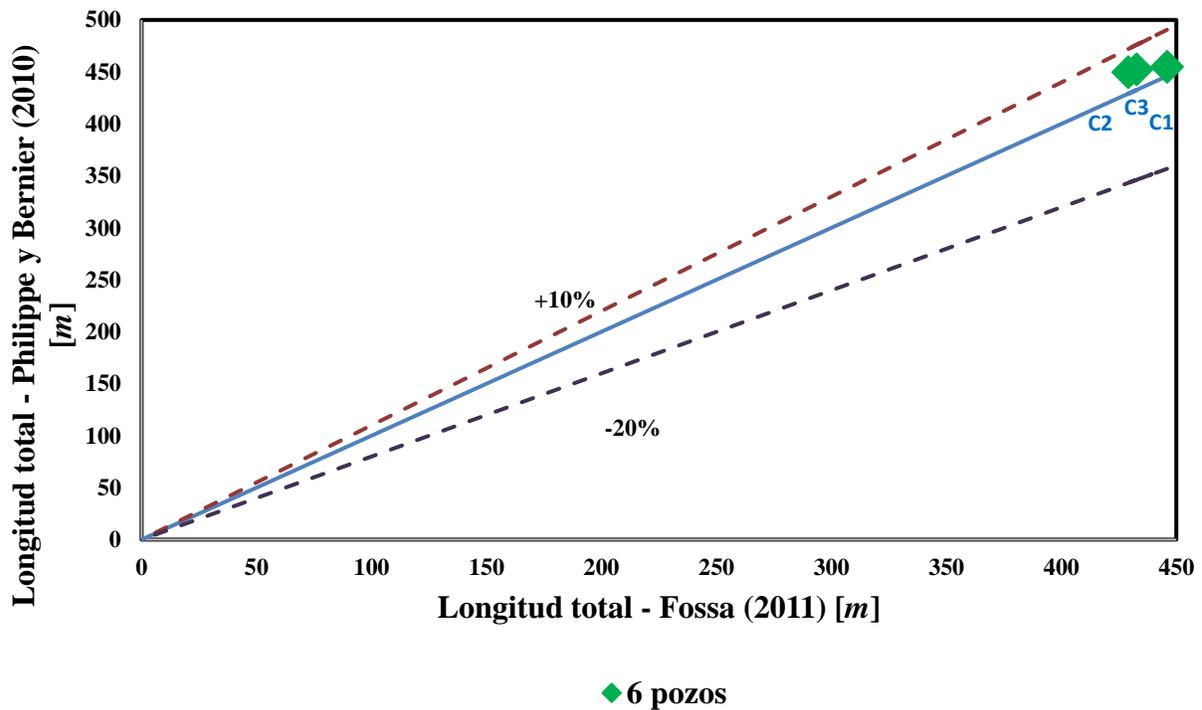


Figura 4.13 Longitud total calculada con el método de Philippe & Bernier (2010) y el método de Fossa (2011)

La Figura 4.14 presenta la comparación entre las longitudes calculadas con el método de Bernier y Amadfarad (2018) y el método de Fossa (2011). Es importante mencionar que el método de Bernier y Amadfarad (2018) no requiere de una temperatura de penalización ( $T_p$ ) para calcular la longitud total. En cambio, se requieren tres funciones  $g$  y las resistencias térmicas del suelo. Este método presentó valores menores a los de referencia para las configuraciones de 6 y 12 pozos. Los resultados muestran que se subestiman las longitudes del método de Fossa (2011) en máximo un 10%, siendo la configuración 1 de 6 pozos la que exhibe una variación menor.

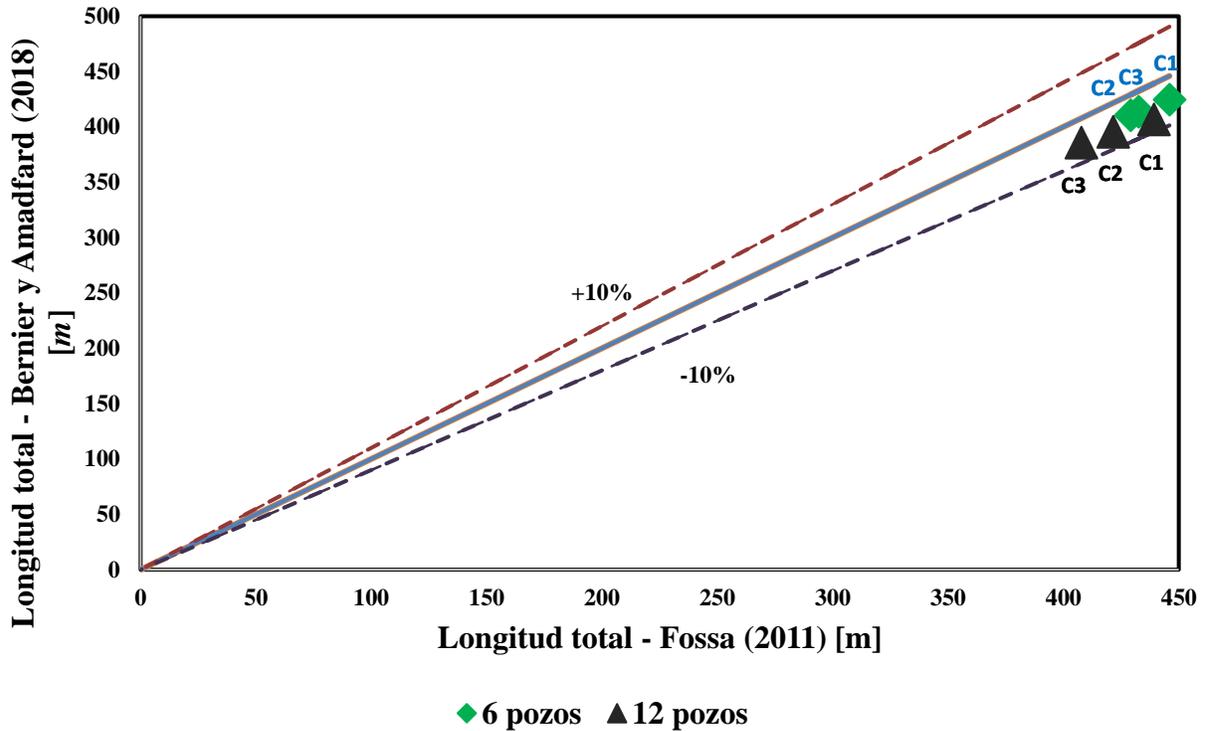
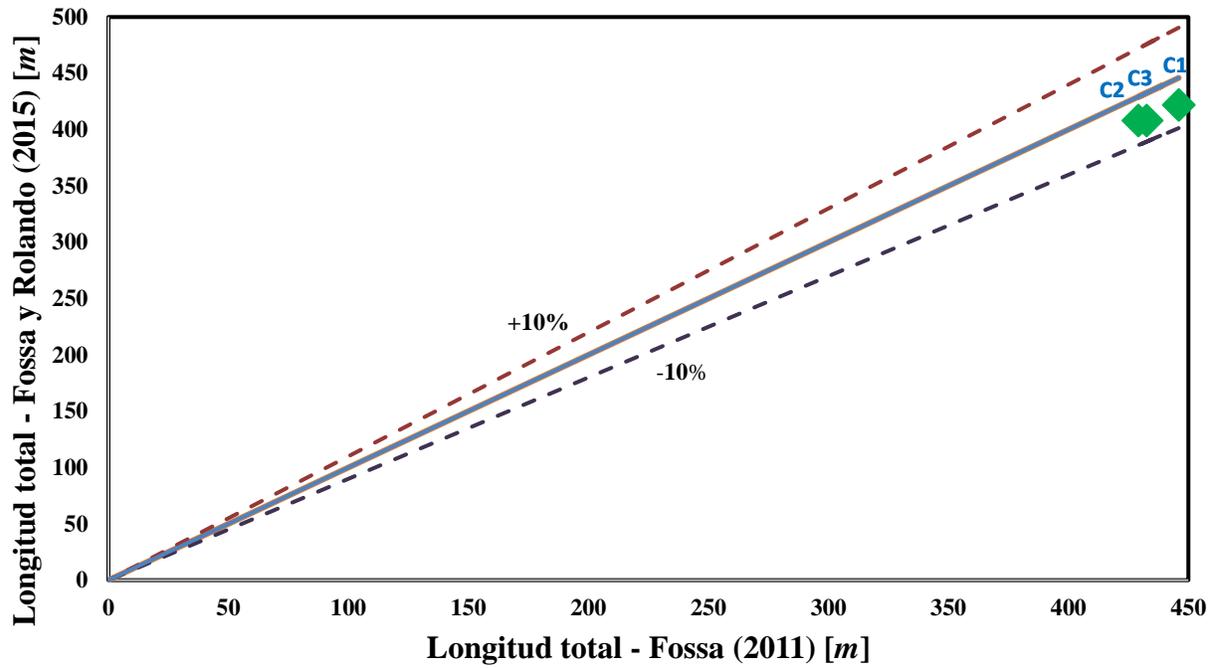


Figura 4.14 Longitud total calculada con el método de Bernier y Amadfarad (2018) y el método de Fossa (2011)

En la Figura 4.15 se observan los resultados obtenidos con el método de Fossa y Rolando (2015). Las longitudes calculadas son menores a las de referencia con un margen menor al 10%, siendo la configuración 1 la que presenta una variación menor dando como resultado una longitud de 421.90 m.



◆ 6 pozos

Figura 4.15 Longitud total calculada con el método de Fossa & Rolando (2015) y el método de Fossa (2011)

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis de licenciatura fue evaluar y comparar las propuestas de mejora a la metodología de la ASHRAE para el diseño de pozos intercambiadores de calor, específicamente en la forma de calcular la temperatura de penalización ( $T_p$ ) y la longitud total requerida para cubrir la demanda térmica de las edificaciones. Con este fin, después de una breve introducción en el Capítulo 1, en el Capítulo 2 se presentaron los conceptos básicos sobre la energía geotérmica y la variación de temperatura en el suelo. Posteriormente, se describieron los componentes y principios de operación de las bombas de calor geotérmico (BCG), así como algunos ejemplos de su uso a nivel nacional e internacional. En el Capítulo 3 se expone la metodología de la ASHRAE para el diseño de pozos intercambiadores de calor, su ecuación fundamental y las propuestas de mejora que han realizado diversos autores para la evaluación de penalización térmica. Por último, en el Capítulo 4 se implementaron las propuestas presentadas en el capítulo anterior para determinar la longitud total de requerida por un sistema a base de pilas de energía ubicado en la Ciudad de México. Se describe la ubicación, geología y propiedades térmicas del sitio de estudio. Finalmente se plantearon distintas configuraciones para los pozos intercambiadores de calor y se evaluó la temperatura de penalización con base en las diferentes propuestas de mejora a la metodología de la ASHRAE.

A partir de los análisis anteriores se determinó que, el método de la ASHRAE es el que presenta una diferencia mayor respecto al método de Fossa (2011). En el caso de la temperatura de penalización ( $T_p$ ) sobrestimó más del 100% a los valores de referencia, mientras que en las longitudes esta diferencia fue de aproximadamente 20% para las configuraciones con 6 y 12 pozos. No obstante,

esto no significa que el método de la ASHRAE deba ser descartado para el diseño de pozos intercambiadores de calor. El método la ASHRAE se fundamenta en un modelo de superposición temporal y con la solución de Fuente Cilíndrica Infinita, lo cual implica limitaciones a largo plazo. En cambio, el método de Fossa (2011) contempla la Fuente Lineal Finita, ya que es la que más se adapta a la superposición espacial para poder simular el comportamiento de los pozos intercambiadores de calor.

Los resultados del método de Philippe y Bernier (2010) presentaron una diferencia menor al 10% respecto a los valores de referencia. Este método propone correlaciones algebraicas para poder calcular las resistencias térmicas y evitar el uso de la Fuente de Calor Cilíndrica. La principal desventaja de esta propuesta es que presenta tres restricciones para poder ser aplicada: 1)  $-2 \leq \ln\left(\frac{t}{t_s}\right) \leq 3$ ; 2)  $4 \leq NB \leq 144$  y 3)  $0.05 \leq B/H \leq 0.1$ . Por lo que no se implementó en las configuraciones de 12 pozos.

La propuesta de Fossa y Rolando (2015) fue la que presentó una diferencia menor respecto a los valores de referencia. Este método descarta la solución de Fuente Lineal Infinita y contempla la superposición espacial. El principal beneficio de usar este método es que mantiene la simplicidad del método de la ASHRAE (2014) y los valores de  $T_p$  calculados son muy precisos ya que presentan una desviación menor al 10%.

Para la propuesta de Capozza (2012) se obtuvieron resultados más favorables para las configuraciones con 6 pozos, la diferencia de la  $T_p$  es menor al 20% y la longitud obtenida varía menos del 10% respecto a los valores de referencia. Este enfoque se basa en el modelo de Fuente Lineal Infinita. Su principal ventaja es que funciona con pocos parámetros de entrada, pero presenta restricciones respecto a la geometría del campo de los pozos y la distancia entre ellos.

En la propuesta de Bernier y Ahmadfard (2018) las configuraciones tanto para 6 como 12 pozos mostraron resultados óptimos, la diferencia fue menor al 10% respecto a los de referencia. Al igual que el método de la ASHRAE (2014), este método contempla las tres resistencias térmicas efectivas del suelo correspondientes a cada pulso evaluado con una función  $g$  cada uno de ellos. Como las funciones  $g$  evaluaron las interacciones térmicas entre los pozos, no es necesario considerar la  $T_p$  en este método y tampoco se hizo uso de la superposición temporal porque no tiene un efecto significativo en el cálculo de la longitud. Asimismo, Bernier y Ahmadfard (2018) demostraron que los efectos a corto plazo si impactan en las resistencias térmicas del suelo. Este método tiene un grado elevado de dificultad, por lo que una limitación es el tiempo de programación para poder usarlo en el diseño de los pozos intercambiadores de calor.

En esta investigación no se comparó el tiempo de cálculo de una metodología con otra, ya que se evaluaron pocas configuraciones de pozos intercambiadores de calor. Sin embargo, la evidencia

científica muestra que los métodos con superposición temporal afectan el tiempo, por lo que se recomienda precaución con el método de Fossa (2011).

En general, todas las propuestas presentan una mejora en las temperaturas y longitudes calculadas en comparación con la ASHRAE (2014), siendo el método de Philippe y Bernier (2010), Capozza (2014) y Fossa y Rolando (2015) los que menos dificultad presentan para ser utilizados y mantienen la sencillez de la ecuación fundamental de la ASHRAE (2014) para el diseño de las estructuras termoactivas.

En cuanto a las configuraciones propuestas para la simulación del campo de pozos intercambiadores de calor en la Ciudad de México, las que están conformadas por 6 pozos no presentaron ningún problema para adaptarse a todas las propuestas de mejora. En cambio, las configuraciones de 12 pozos no fueron aptas para todas las metodologías analizadas. La configuración que presentó mejores resultados fue la Configuración 1 con 6 pozos con el método de Bernier y Ahmadfard (2018) y Capozza (2012). Asimismo, se observó que la penalización de temperatura ( $T_p$ ) es muy sensible a la configuración del campo de pozos intercambiadores de calor y está en función del número de pozos adyacentes entre sí.

## 5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados anteriores se recomienda que, al momento de diseñar un campo de pozos intercambiadores de calor se prioricen las configuraciones que tengan poco segmentos y profundidades más largas. Además, para diámetros menores o iguales que 10.16 cm, no se debe tener una distancia entre pozos mayor a 6 m, de tal forma que las restricciones que tiene cada método se cumplan y se puedan aplicar.

Por otra parte, se recomienda seleccionar al menos dos métodos para calcular la temperatura de penalización con el fin de corroborar la tendencia de los resultados y analizar diferentes escenarios para tomar una mejor decisión. Si se tienen pocas configuraciones, sin importar si son modelos FLS o ICS, optar por el método de Capozza (2012), Bernier y Rolando (2015) o Bernier y Philippe (2010) por su bajo nivel de dificultad. En cambio, si se desean analizar múltiples de configuraciones, se recomienda optar por el método de Bernier y Ahmadfard (2018) debido a su metodología iterativa basada en funciones  $g$  que evalúan las interacciones entre pozos intercambiadores de calor. La geometría que se decida para cada campo de pozos intercambiadores de calor tiene un papel importante al momento de calcular la  $T_p$ . Por ello, se recomienda tener pocos pozos, configuraciones cuadradas o rectangulares y evitar configuraciones irregulares.



## REFERENCIAS

- Ahmadfard, M., y Bernier, M. (2018). Modifications to ASHRAE's sizing method for vertical ground heat exchangers. *Science and Technology for the Built Environment*, 24, 803–817.
- Arellano, A. (2014). Cambio climático y sociedad. Serie medio ambiente y ecología, 169-172.
- Alfè, D., Gillan, M., y Prince, G. (2002). Composition and temperatura of the Earth's core constrained by combining ab initio calculations and seismic data. *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 91-98.
- ASHRAE, H. A. S. H. (2011). HVAC applications handbook.IP Edition.
- Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC). (2022). Funcionamiento de las Bombas de Calor Aerotérmicas.
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2012). Guía Técnica: Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. *Madrid, España: IDAE*.
- Barba-Galdámez, D.F. (2018). Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas con énfasis en pilas de energía (Tesis de maestría). *Universidad Nacional Autónoma de México. México*.
- Barba-Galdámez, D.F. (2023). Comunicación Personal.
- Banks, D. (2012). An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. *West Sussex. John Wiley & Sons*.
- Bejan, A. (2013). Convection heat transfer. *John wiley & sons*.
- Boehler, R. (1996). Melting temperatura of the Earth's mantle and core: Earth's Thermal Structure. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, 15-40.
- Capozza, A., De Carli, M., y Zarrella, A. (2012). Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. *Energy and Buildings*, 55, 369–379.
- Carslaw, H., y Jaeger, J. (1959). Conduction of heat in solids. *Clarendon Press, Oxford*.
- Cullin, J.R., y Splitter, J.D. (2011). A computationally efficient hybrid time sted methodology for simulation of ground heat exchangers. *Geothermics*, 40, 144-156.
- Dickson, M., y Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la Energía Geotérmica?. *Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia*.

- Domingo, A. (2011). Apuntes de Transmisión del calor. *Universidad Politécnica de Madrid, España*.3-19.
- Izquierdo, E. (2012). Cómo ahorrar electricidad al usar aire acondicionado. *Eroski Consumer*.
- Espiñeira, P. (2022). ¿Qué es un evaporador de aire acondicionado?. *Caloryfrio.com*.
- Franco, A., Moffat, R., Toledo M., y Herrera, P. (2016). Numerical sensitivity analysis of termal response test (TRT) in energy piles. *Renewable Energy*, 86, 985-992.
- Fossa, M. (2011). The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchangers for heat pump applications. *Energy and Buildings*, 43, 1473–1479.
- Fossa, M., y Rolando, D. (2015). Improving the Ashrae method for vertical geothermal borefield design. *Energy and Buildings*, 93, 315–323.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENER). (2014). Guía sobre estructuras termoactivas y sistemas inerciales en la climatización de edificios. *Mósteroles, Madrid*.13-21.
- García, A., y Martínez, I. (2012). Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico. *Instituto de Investigaciones Eléctricas*.
- Gautschi, W., y Cahill, W. (1964). Handbook of mathematical functions.
- Ghasemi-Fare, O., y Basu, P. (2013). A practical heat transfer model for geothermal piles. *Energy and Buildings*, 66, 470-479.
- GreenMatch. (2021). The Benefits of Ground Source Heat Pumps. *Blog*.
- Gobierno de México. (2019). Puesta en operación del sistema de climatización mediante bomba de Calor Geotérmica del CECCAB en el INEEL.
- Hosokawa, K. (2019). Comportamiento termomecánico de las estructuras termoactivas (Tesis doctoral). *Universidad Politécnica de Madrid. España*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI).
- Javed, S., y Splitter, J. (2016). Calculation of borehole termal resistance. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 65-91.

Kagel, A., y Gawell, K. (2005). Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis. *The Electricity Journal*, 18, 90-99.

Kavanaugh, S. (1995). A design method for comercial ground-coupled heat pumps. *ASHRAE Transactions*, 101, 108-1094.

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

Kjellsson, E., Hellström, G., y Perers, B. (2010). Optimization of systems with the combination of groundsource heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy*, 35, 2667-2673.

Li, M., Li, P., Chan, V., y Lai, A. C. (2014). Full-scale temperature response function (G-function) for heat transfer by borehole ground heat exchangers (GHEs) from sub-hour to decades. *Applied Energy*, 136, 197-205.

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

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*, 158–183.

López-Acosta, N. P., y Barba-Galdámez, D. F. (2022). Diseño térmico preliminar del primer proyecto de pilas de energía en México. *5° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas, México*.

López-Acosta, N. P., y Barba-Galdámez, D. F. (2018). Pilas o Pilotes de energía: cimentaciones termoactivas para el aprovechamiento de recurso geotérmicos. *Tecnología e innovación, SMIG*, 247, 36-39.

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

Lunis, B., y Breckenridge, R. (1991). Enviromental considerations. *Geothermal Direct Use, and Design Guidebook, Geoheat Center, Oregon*, 437-445.

Mogensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in Duct system heat storages. *Conference on subsurface heat storage in theory and practice, Sweden*, 652-657.

- Mundo Hvacr. (2016). Edificios consumen 40% de la electricidad en México.
- National Geographic. (2022). ¿Qué es la energía geotérmica?. *Medio ambiente*.
- Ochsner, T. (2017). Rain or shine: an introduction to soil physical properties and processes. *Oklahoma State University, Estados Unidos*.
- Pedersen, C., (2018). Ground-Source Heat Pumps. *North Dakota State University*.
- Peña, A. (2022). Bomba de calor geotérmica para calefacción y refrigeración. ¿Cómo funciona?. Caloryfrio.com.
- Philippe, M., Bernier, M., Eng, P., y Marchio, D. (2010). *Vertical Geothermal Borefields. Ashrae Journal, (July)*, 10.
- Prol-Ledesma, R. M. (2000). El calor de la Tierra. Fondo de Cultura Económica.
- Proyeco S.A. (2021). Proyecto calzada peatonal Chivatito. *Estudio de mecánica de suelos para la alcaldía Miguel Hidalgo*.
- Rybach, L. (2001). Design and performance of borehole heat exchanger. *European Summer School on Geothermal Energy Applications, Rumania*.
- Sokolova, I. (2019). Temperature Regulation. *Encyclopedia of Ecology*, 3, 633-639.
- Spitler, J. D., y Bernier, M. (2016). Vertical borehole ground heat exchanger design methods. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 33-61.
- Spitler, J.D. (2000). GLHEPRO – a design tool for commercial building ground loop heat exchangers. *Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Québec*.
- Statista. (2023). Número de viviendas construidas en México de 2013 a 2021. *Construcción*.
- Suárez-Dominguez, A., y Zuñiga, C. (2018). Resistencia mecánica y conductividad térmica del suelo cemento plástico con adición de fibra vegetal. *Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, Guatemala*.
- Urone, P., y Hinrochs, R. (2012). Heat and Heat Transfer Methods. *Valdosta State University, Estados Unidos*.
- U.S. Department of Energy. (2011). Guide to Geothermal Heat Pumps. Energy Efficiency & Renewable Energy.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Heat Pumps. *Burn Wise*.

## ANEXO I. PROPUESTAS PARA LAS CONFIGURACIONES DE LOS POZOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

### I 1. Propuesta 1 para la configuración de los pozos intercambiadores de calor

A continuación, se presentan las distribuciones propuestas para los campos conformados por 12 pozos intercambiadores de calor a una profundidad de 30 m y una separación de 8 m entre cada uno de ellos. En las Figuras I.1, I.2 y I.3 se indica en color negro el perímetro de la construcción, de color azul el contorno de la casa, el color verde corresponde a la configuración de los pozos y los círculos rojos representan cada pozo. Es importante mencionar que, el diámetro de los pozos no se encuentra a escala, ya que resultaría más complicado identificarlos por su tamaño.

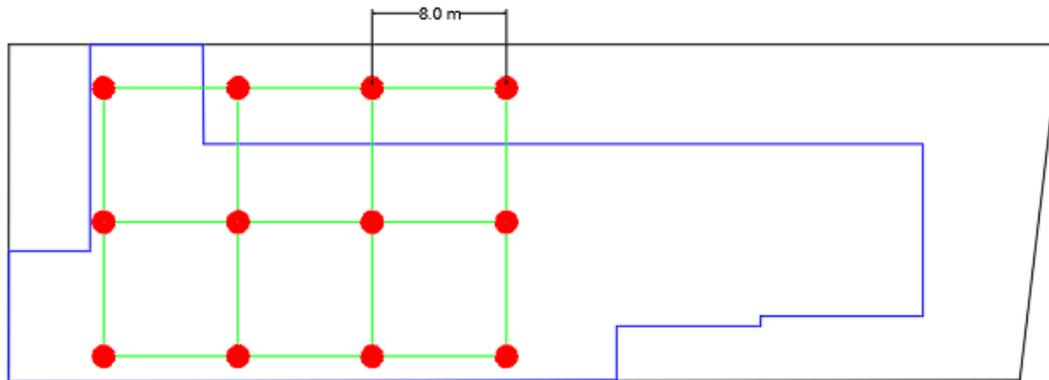


Figura I.1 Propuesta 1 – configuración 1



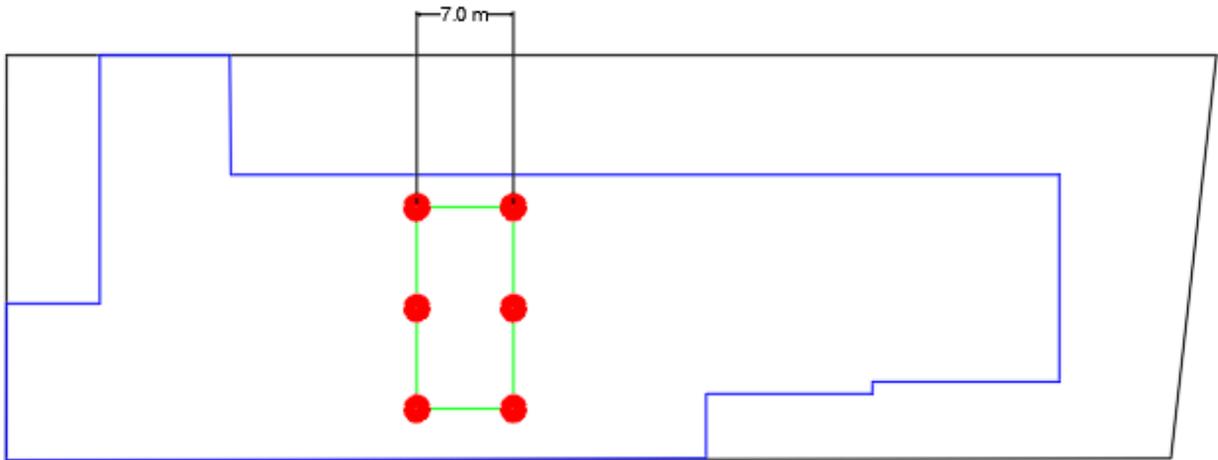


Figura I.4 Propuesta 2 – configuración 2

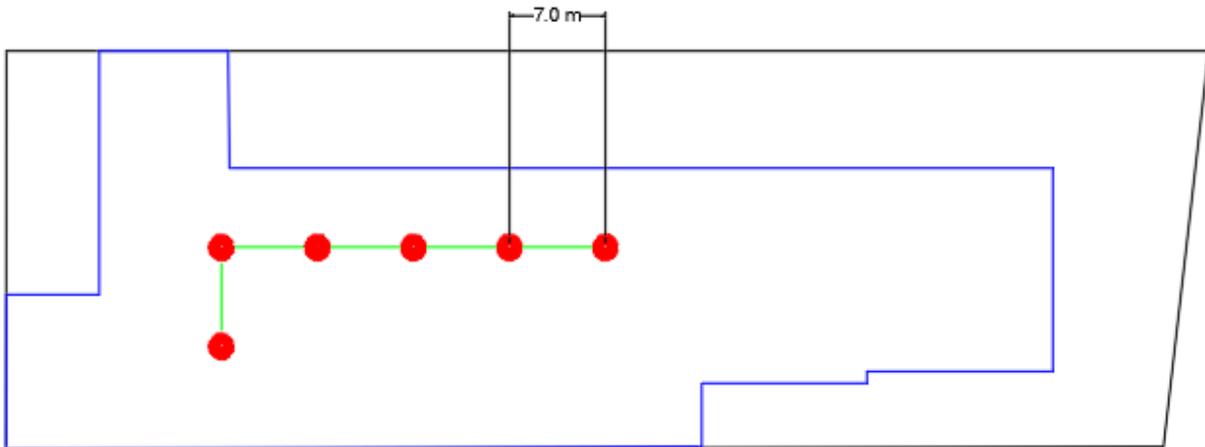


Figura I.5 Propuesta 2 – configuración 3

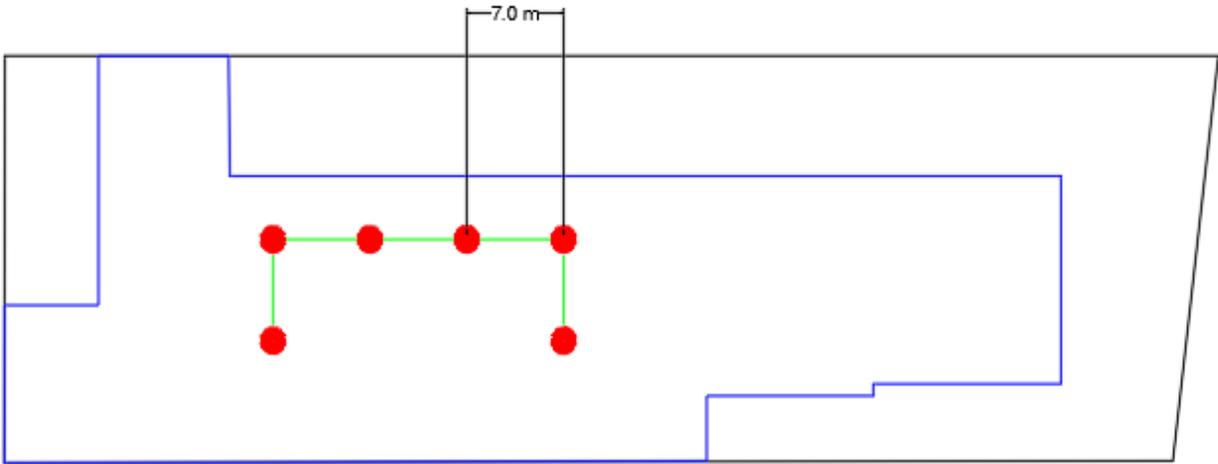


Figura I.6 Propuesta 2 – configuración 4

## ANEXO II. CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA SIMULAR EL MÉTODO DE FOSA (2011)

En este apartado, se presenta el código desarrollado en Matlab® por Barba (2023) para calcular la temperatura de penalización ( $T_p$ ) con la propuesta de Fossa (2011). El programa consta de tres partes: (a) Código general para determinar la ( $T_p$ ), (b) Cálculo de la función  $G$  para la Fuente Cilíndrica Infinita y (c) Función  $G$  para la Fuente Lineal Finita.

### II.1. Código general

```
%%% CODIGO PARA DETERMINAR  $T_p$  PARA POZOS INTERCAMBIADORES DE  
CALOR DE ACUERDO CON FOSSA (2011) %%%
```

```
%% DEFINICION DE CONDICIONES INICIALES
```

```
% Suelo
```

```
lambda_s=1.6; % Conductividad termica (W/m/K)
```

```
alpha_s=1.4E-6; % Difusividad termica (m2/s)
```

```
% Intercambiador de calor (GHE)
```

```
rb=0.1016/2; % Radio de la pila/pozo (m)
```

```
L0=500;
```

```
% Cargas termicas
Qy=2130; % Carga termica anual (W)
Qm=5853.92; % Carga termica mensual (W)
Qd=17122.68; % Carga termica 4 h (W)

% Tiempos de analisis
t1=10*365*24*3600;
t2=10*365*24*3600+30*24*3600;
t=10*365*24*3600+30*24*3600+4*3600; % Tiempo maximo de analisis (s)

% Resistencias termicas
Gf=ICSM(lambda_s,alpha_s,rb,rb,t);
G1=ICSM(lambda_s,alpha_s,rb,rb,t-t1);
G2=ICSM(lambda_s,alpha_s,rb,rb,t-t2);

Rga=Gf-G1;
Rgm=G1-G2;
Rgst=G2;

% Condiciones de analisis
Rb=0.074948504; % Resistencia termica del pozo
Fsc=1.04;
T0=18.8; % Temperatura no alterada del suelo
ELT=1.8; % Temperatura de agua entrante
LLT=5; % Temperatura de agua saliente

%% DEFINICION DE CONDICIONES ESPACIALES DE ANALISIS
nGHE=input('Numero de GHE: '); % Numero de GHE
if nGHE>1
    coor=zeros(nGHE,2); % Matriz con coordenadas de los GHEs - X/Y (m)
    for i=1:nGHE
        coor(i,:)=input(sprintf('Coordenada de GHE #%d [X,Y]: ',i));
    end
    D=zeros(nGHE); % Matriz de distancias entre GHEs (m)
    for i=1:nGHE
        for j=i:nGHE
            if i==j
                D(i,j)=rb;
            else
                D(i,j)=sqrt((coor(i,1)-coor(j,1))^2+(coor(i,2)-coor(j,2))^2);
                D(j,i)=D(i,j);
            end
        end
    end
end
else
```

```
D=rb;
end

dist=unique(D);    % Valores diferentes de distancia entre pozos/pilas
nunGHE=size(dist,1); % Numero de distancias unicas
H=L0/nGHE;        % Longitud de pilas

%% ANALISIS ITERATIVO
tol=1e-5;
rev=1;

while abs(rev)>tol

    % CALCULO DE RESPUESTA TERMICA DEL POZO
    Gs=zeros(nunGHE,1);    % Funcion G del suelo
    for i=1:nunGHE
        Gs(i,1)=FLSM_sim(lambda_s,alpha_s,dist(i),t,H);
    end

    % CALCULO DE RESPUESTA TERMICA PROMEDIO
    dT_GHE=zeros(nGHE,1);
    for i=1:nGHE
        for j=1:nGHE
            dT_GHE(i,1)=Gs(dist==D(i,j),1)+dT_GHE(i,1);
        end
    end

    GammaG=mean(dT_GHE);
    GammaC=ICSM(lambda_s,alpha_s,rb,rb,t);
    DG=GammaG-GammaC;

    Tp=Qy*DG/L0;
    Ln=(Qd*Fsc*Rgst+Qd*Rb+Qm*Rgm+Qy*Rga)/(T0-(ELT+LLT)/2-Tp);

    rev=abs((L0-Ln)/Ln);
    L0=Ln;
    H=L0/nGHE;
end
```

## II.2. Función G para fuente cilíndrica infinita

```
function [G]=ICSM(lambda,alpha,r,r0,t)
%% Modelo de fuente Cilindrica Infinita (Nota T=q*G)
% Variables:
```

```

% lambda = Conductividad termica del medio (W/m/K)
% alpha = Difusividad termica del suelo (m2/s)
% r = Distancia radial (m)
% r0 = Radio de la fuente cilindrica (m)
% t = Tiempo de analisis (s)

fun=@(u) (exp(-alpha.*u.^2.*t)-1).*(besselj(0,u.*r).*bessely(1,u.*r0)-
bessely(0,u.*r).*besselj(1,u.*r0))./u.^2./(besselj(1,u.*r0).^2+bessely(1,u.*r0).^2);
G=1/pi^2/r0/lambda*integral(fun,0,inf);
end

```

### II.3. Función G para fuente lineal y finita

```

function [G]=FLSM_sim(lambda,alpha,r,t,H)
%% Modelo de fuente Lineal Finita en z=H/2 (Nota T=q*G)
% Procedimiento simplificado de Lamarche & Beauchamp (2007)
% Variables:
% lambda = Conductividad termica del medio (W/m/K)
% alpha = Difusividad termica del suelo (m2/s)
% r = Distancia radial (m)
% t = Tiempo de analisis (s)
% H = Longitud de la fuente de calor (m)
beta=r/H;
omega=H/sqrt(4*alpha*t);
Da=sqrt(beta^2+1)*erfc(omega*sqrt(beta^2+1))-beta*erfc(omega*beta)-
1/omega/sqrt(pi())*(exp(-omega^2*(beta^2+1))-exp(-omega^2*beta^2));
Db=sqrt(beta^2+1)*erfc(omega*sqrt(beta^2+1))-
0.5*(beta*erfc(omega*beta)+sqrt(beta^2+4)*erfc(omega*sqrt(beta^2+4)))-
1/omega/sqrt(pi())*(exp(-omega^2*(beta^2+1))-0.5*(exp(-omega^2*beta^2)+exp(-
omega^2*(beta^2+4))));
fun=@(z) erfc(omega*z)./sqrt(z.^2-beta.^2);
int1=integral(fun,beta,sqrt(beta.^2+1));
int2=integral(fun,sqrt(beta.^2+1),sqrt(beta.^2+4));
integ=int1-Da-int2-Db;
G=1/2/pi/lambda*integ;
end

```

## ANEXO III. CÓDIGO IMPLEMENTADO PARA SIMULAR EL MÉTODO DE AHMADFARD Y BERNIER (2018) (Barba, 2023)

En este anexo, se presenta el código desarrollado en Matlab® elaborado por Barba (2023) para realizar el proceso iterativo del cálculo de la longitud total requerida para la energía térmica requerida. El programa se divide en dos partes: (a) Código general y (b) Función h de Cimmino y Bernier (2013).

### III. 1. Código general

```
%%% CODIGO PARA DETERMINAR Tp REAL PARA POZOS  
INTERCAMBIADORES DE CALOR - AHMADFARD & BERNIER (2018) %%%
```

```
%% DEFINICION DE CONDICIONES INICIALES
```

```
% Suelo
```

```
lambda_s=1.6; % Conductividad termica (W/m/K)
```

```
alpha_s=1.4E-6; % Difusividad termica (m2/s)
```

```
% Intercambiador de calor (GHE)
```

```
rb=0.1016/2; % Radio de la pila/pozo (m)
```

```
L0=400;
```

```
% Cargas termicas
```

```
Qy=2130; % Carga termica anual (W)
```

```
Qm=5853.92; % Carga termica mensual (W)
```

```
Qd=17122.68; % Carga termica 4 h (W)
```

```
% Tiempos de analisis
```

```
t1=10*365*24*3600;
```

```
t2=10*365*24*3600+30*24*3600;
tf=10*365*24*3600+30*24*3600+4*3600; % Tiempo maximo de analisis (s)
ta=[tf-t2, tf-t1, tf];
G=zeros(1,3);

% Condiciones de analisis
Rb=0.074948504; % Resistencia termica del pozo
T0=18.8; % Temperatura no alterada del suelo
ELT=1.8; % Temperatura de agua entrante
LLT=5; % Temperatura de agua saliente

%% DEFINICION DE CONDICIONES ESPACIALES DE ANALISIS

nGHE=input('Numero de GHE: '); % Numero de GHE
nSPB=input('Numero de segmentos por GHE: '); % Numero de segmentos por GHE
nT=nGHE*nSPB; % Numero total de segmentos
coor=zeros(nGHE,3); % Matriz con coordenadas de los GHEs - X/Y (m)
H=L0/nGHE; % Longitud de pilas
Hs=H/nSPB;

for i=1:nGHE
    coor(i,1:2)=input(sprintf('Coordenada de GHE #%d [X,Y]: ',i));
    coor(i,3)=0;
    for j=2:nSPB
        coor(i+(j-1)*nGHE,1:2)=coor(i,1:2);
        coor(i+(j-1)*nGHE,3)=(j-1)/nSPB*H;
    end
end

D=zeros(nT); % Matriz de distancias radiales entre segmentos de GHEs (m)
Di=zeros(nGHE); % Matriz de distancias entre GHEs (m)

for i=1:nGHE
    for j=i:nGHE
        if i==j
            Di(i,j)=rb;
        else
            Di(i,j)=sqrt((coor(i,1)-coor(j,1))^2+(coor(i,2)-coor(j,2))^2);
            Di(j,i)=Di(i,j);
        end
    end
end

for i=1:nSPB
```

```
for j=i:nSPB
    D(1+(i-1)*nGHE:nGHE+(i-1)*nGHE,1+(j-1)*nGHE:nGHE+(j-1)*nGHE)=Di;
    D(1+(j-1)*nGHE:nGHE+(j-1)*nGHE,1+(i-1)*nGHE:nGHE+(i-1)*nGHE)=Di;
end
end

vec=cell(nT,nT);    % Vector asociado a cada segmento de GHE - [rij, Di, Dj]
ap=zeros(nT^2,3);
k=1;
for i=1:nT
    for j=1:nT
        vec{i,j}=[D(i,j),coor(i,3),coor(j,3)];
        ap(k,:)=vec{i,j};
        k=k+1;
    end
end
vec_unq=unique(ap,'rows');

%% ANALISIS ITERATIVO
tol=1e-5;
rev=1;
while abs(rev)>tol

    for i=1:3
        % CALCULO DE RESPUESTA TERMICA DEL POZO
        hij=zeros(length(vec_unq),1);    % Funcion hij del suelo para valores individuales

        for j=1:length(vec_unq)
            hij(j,1)=hCimBer(alpha_s,vec_unq(j,1),ta(i),Hs,vec_unq(j,2),vec_unq(j,3));
        end

        H=zeros(nT+1);    % Matriz de respuesta termica hij
        for j=1:nT
            for k=1:nT
                [R,LocR]=ismember(vec{j,k},vec_unq,'rows');
                H(j,k)=hij(LocR,1);
            end
        end

        H(1:nT,nT+1)=-1;
        H(nT+1,1:nT)=1;

        theta=zeros(nT+1,1);
        theta(nT+1,1)=nT;
    end
end
```

```

X=linsolve(H,theta);
G(i)=X(nT+1,1);
end

Rga=(G(3)-G(2))/2/pi/lambda_s;
Rgm=(G(2)-G(1))/2/pi/lambda_s;
Rgst=G(1)/2/pi/lambda_s;

Ln=(Qd*1.04*Rgst+Qd*Rb+Qm*Rgm+Qy*Rga)/(T0-(ELT+LLT)/2);

rev=abs((L0-Ln)/Ln);
L0=Ln;
H=L0/nGHE;
Hs=H/nSPB;

for i=1:nGHE
    for j=2:nSPB
        coor(i+(j-1)*nGHE,3)=(j-1)/nSPB*H;
    end
end
vec=cell(nT,nT);    % Vector asociado a cada segmento de GHE - [rij, Di, Dj]
ap=zeros(nT^2,3);
k=1;
for i=1:nT
    for j=1:nT
        vec{i,j}=[D(i,j),coor(i,3),coor(j,3)];
        ap(k,:)=vec{i,j};
        k=k+1;
    end
end
vec_unq=unique(ap,'rows');
end

```

### III. 2. Función h de Cimmino & Bernier (2013)

```

function [h]=hCimBer(alpha,r,t,Hs,Di,Dj)
%% Metodo de Cimmino y Bernier (2013)
% Variables:
% alpha = Difusividad termica del suelo (m2/s)
% r      = Distancia radial entre segmentos i y j (m)
% t      = Tiempo de analisis (s)
% H      = Longitud de los segmentos (m)
% Di     = Profundidad del segmento i
% Dj     = Profundidad del segmento j

```

```
liminf=1/sqrt(4*alpha*t);  
fun=@(s) exp(-r.^2.*s.^2)./Hs./s.^2.*Y(Hs.*s,Di.*s,Dj.*s);  
h=1/2*integral(fun,liminf,inf);
```

```
function [res]=Y(H1,D1,D2)  
    res=f(D2-D1+H1)+f(D2-D1-H1)+2.*f(D2+D1+H1)-2.*f(D2-D1)-f(D2+D1)-  
    f(D2+D1+2*H1);  
end
```

```
function [res]=f(x)  
    res=x.*erf(x)-(1-exp(-x.^2))./sqrt(pi);  
end  
end
```