

Modelado y simulación de la transferencia de calor de un sistema de climatización mediante pozos Canadienses

Modeling and simulation of heat transfer in an air conditioning system using Canadian wells

Y. Ferro-Valadez ^a, L. A. Cantera-Cantera ^{a,b,*}

^a CADIT, Universidad Anáhuac México, Av. Universidad Anáhuac 46, Col. Lomas Anáhuac, Huixquilucan 52786, Mexico

^b Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, ESIME-Z, 07738, CDMX, Mexico

Resumen

En este trabajo se realiza el análisis del sistema comúnmente conocido como pozos canadienses, mediante la aplicación de un modelo matemático que permite simular el funcionamiento del sistema, haciendo variaciones en las condiciones externas al sistema, como temperaturas ambientales, tipo de suelo de la región y los materiales elegidos. El funcionamiento de este tipo de sistemas geotérmicos consiste en hacer pasar aire a través de una configuración de conductos enterrados a cierta profundidad, entre 2 m y 10 m de profundidad, donde la teoría indica que la temperatura del suelo es constante y de esta manera se puede lograr un equilibrio térmico entre el aire que se hace pasar a través de los tubos y el que se obtiene del exterior, logrando así una temperatura más confortable al introducirlo en una habitación. Utilizando este principio, el sistema permite ahorrar energía eléctrica al mismo tiempo que se disminuye la huella de carbono, pues se puede prescindir de un sistema de aire acondicionado convencional.

Palabras Clave: Modelado matemático, Simulación, Pozos Canadienses, Climatización, Energía geotérmica.

Abstract

This work presents an analysis of the system commonly known as Canadian wells, using a mathematical model that simulates the system's operation by varying external conditions, such as ambient temperatures, soil types in the region, and the selected materials. The operation of this type of geothermal system involves passing air through a configuration of ducts buried at a certain depth, typically between 2 m and 10 m, where theory indicates that the ground temperature remains constant. This allows for thermal equilibrium between the air passing through the pipes and the outside air, resulting in a more comfortable temperature when introduced into an indoor space. Based on this principle, the system enables electrical energy savings while also reducing the carbon footprint, as it can eliminate the need for a conventional air conditioning system.

Keywords: Mathematical Modeling, Simulation, Canadian Wells, Air Conditioning, Geothermal Energy.

1. Introducción

La energía geotérmica es aquella contenida en forma de calor dentro de la tierra, proviene del núcleo terrestre y del calor residual de la formación del planeta. Es el motor de los procesos geológicos a escala regional, es decir, es la misma energía que permite que las placas tectónicas se muevan o se produzcan erupciones volcánicas. Esta energía es prácticamente inagotable; sin embargo, no es posible obtenerla en cualquier parte del planeta y en aquellas regiones donde se presenta (por ejemplo: en forma de aguas termales o géiseres) no siempre se logra

aprovechar. Se extrae mediante pozos perforados en la corteza terrestre alcanzando zonas con altas temperaturas. Algunos de sus principales usos pueden ser: generación de electricidad, calefacción y refrigeración de edificios, usos industriales y agrícolas, balnearios, turismo termal, invernaderos y acuicultura. Aunque la energía geotérmica se puede clasificar por el tipo de yacimiento y por la temperatura a la que se encuentran estos, lo más común es clasificarla de acuerdo con la profundidad y la cantidad de calor que puede obtenerse. Por ejemplo (Cárcel Carrasco y Martínez Márquez, 2015):

- **Recursos geotérmicos de muy baja temperatura:** es el

*Autor para correspondencia: calberto@anahuac.mx, lcanterac@ipn.mx

Correo electrónico: yesica.ferrova@anahuac.mx (Yesica Ferro-Valadez), calberto@anahuac.mx, lcanterac@ipn.mx (Luis Alberto Cantera-Cantera).

Historial del manuscrito: recibido el 15/07/2025, última versión-revisada recibida el 20/10/2025, aceptado el 14/10/2025, publicado el 25/03/2026. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15513>



yacimiento geotérmico cuando la temperatura es menor de 25 °C con perforación somera o superficial que no es mayor a 10 metros. Llamada también de muy baja entalpía. Se utiliza principalmente para calefacción geotérmica y climatización de viviendas y casas.

- **Recursos geotérmicos de baja temperatura:** es el yacimiento geotérmico donde la temperatura está entre 25 y los 90 °C con una perforación entre 10 y 200 metros. También denominada de baja entalpía. El contenido del calor en el subsuelo es insuficiente para producir energía eléctrica. Con presencia de acuíferos profundos se puede aprovechar directamente el agua caliente.
- **Recursos geotérmicos de temperatura media:** es el yacimiento geotérmico con temperatura entre 90 y 150 °C donde la perforación está entre 200 y 3,000 metros. Llamada también de media entalpía. Se utiliza para la producción eléctrica renovable con ciclos binarios, sistemas de calefacción urbanos y en procesos industriales.
- **Recursos geotérmicos de alta temperatura:** es el yacimiento geotérmico con temperatura mayor 150 °C donde la perforación es muy profunda, entre 3,000 y 10,000 metros. Denominada también de alta entalpía. Cuando la temperatura es superior a 150 °C permite una transformación directa del vapor de agua en energía eléctrica. Aquí, las centrales geotérmicas se emplazan habitualmente sobre los yacimientos.

1.1. Pozos canadienses o provenzales

Se trata de un sistema de climatización que comenzó a ser utilizado en Canadá para mejorar la temperatura de las viviendas en un clima tan frío. Es conocido también como pozo provenzal debido a que se ha utilizado en la región de la Provenza Francesa para refrescar las viviendas durante el verano. El principio del sistema consiste en aprovechar el calor de la tierra, ya que a determinada profundidad se puede obtener una temperatura constante cercana a 15° y 18° centígrados (variando según la región del planeta), por lo que al hacer pasar aire por los conductos enterrados se consigue subir su temperatura en épocas de invierno y bajarlas en verano; debido a la transferencia de calor por el contacto con la tierra, utilizando energía geotérmica de muy baja entalpía (Soni *et al.*, 2015).

En la Figura 1 se muestra un pozo canadiense o provenzal, que funciona como un intercambiador de calor tierra-aire, que usa el subsuelo para el calentamiento y enfriamiento de corrientes de aire que circulan a través de un sistema de tubos enterrados, contribuyendo a incrementar la temperatura del aire que ingresa en los inmuebles en invierno y reduciéndola en verano (Urgilez-González *et al.*, 2023).

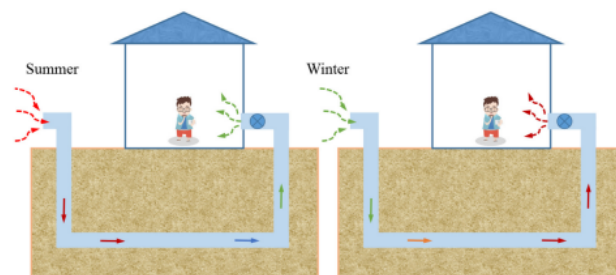


Figura 1: Funcionamiento en Verano e Invierno (Cabezas, 2013).

De manera global, el consumo de energía en viviendas para calefacción y enfriamiento ha aumentado durante las últimas décadas. Sin embargo, los sistemas convencionales de aire acondicionado y calefacción resultan muy costosos y consumen considerables cantidades de energía eléctrica, lo que deriva en que solo pocas personas tengan acceso; además, se incrementa la huella de carbono. Por ello, introducir sistemas pasivos de calefacción y enfriamiento es una alternativa para el ahorro de energía y, al mismo tiempo, disminuir las emisiones de carbono. Los pozos canadienses o provenzales representan una alternativa sustentable para lograr confort térmico dentro de una vivienda, pues, si bien no siempre es posible lograrlo solamente con el uso de este sistema, se puede utilizar para pre-calentar o pre-enfriar el aire, antes de utilizar un sistema convencional de aire acondicionado (AC) y de esta manera reducir el consumo de energía eléctrica. Algunos de los beneficios de este sistema son los siguientes: a) Es un sistema sustentable, ya que no produce emisiones de carbono, b) Se ahorra energía eléctrica, c) Tiene un tiempo de vida que va de los 15 a los 20 años, d) No requiere mucho mantenimiento. e) No es afectado por las condiciones meteorológicas o estacionales. f) Se disminuye significativamente el ruido comparado con un sistema de AC convencional. g) Es fácil de instalar, especialmente si se hace durante la construcción de la vivienda. h) Se requiere una baja inversión comparada con un sistema de climatización convencional. Para lograr su implementación, es necesario en primer lugar realizar un análisis de las condiciones ambientales, geográficas y edafológicas de la región donde se planea instalar y así evaluar su funcionamiento potencial. En este sentido, existen diversos trabajos enfocados tanto en el desarrollo de modelos matemáticos como en estudios experimentales del intercambio de calor en provenzales. En el artículo de revisión de Soni *et al.* (2015), se presentan estudios en dos configuraciones: intercambiador de calor tierra-aire (EAHE, por sus siglas en inglés) y la bomba de calor geotérmica (GSHP, por sus siglas en inglés). Específicamente en el EAHE o provenzal, se reportan modelos matemáticos de 1, 2 y 3 dimensiones para determinar las relaciones entre las temperaturas de entrada y salida. En la parte experimental, se ha encontrado que el intercambio de calor no se ve afectado por el material de las tuberías enterradas, tanto para calefacción en invierno como para refrigeración en verano. Por otro lado, Andújar Márquez *et al.* (2016) presenta un sistema de instrumentación para la medición indirecta de la difusividad térmica de un suelo a una determinada profundidad. Construyeron un arreglo con 24 sensores colocados en una tubería de PVC de 5 metros y fue introducida en una excavación vertical.

Se hicieron mediciones continuas durante un año para registrar las mediciones promedio mensuales y anuales en determinadas profundidades. Por otra parte, del Pino Fernández *et al.* (2023) utilizaron los datos de una sonda de temperatura enterrada en el terreno donde se instalaría el provenzal para calcular el valor de la difusividad térmica y poder realizar un mejor dimensionamiento de la instalación.

Con base en lo anterior, es evidente que un análisis teórico-experimental e instalación del sistema provenzal conllevan un trabajo multidisciplinario y tiempo para recolección de datos. Por lo que, este trabajo se busca, mediante un modelo matemático, realizar un análisis cuantitativo sobre el comportamiento de pozos canadienses o provenzales en México. Tomando como base las condiciones ambientales, geográficas y edafológicas de Toluca, Estado de México, que por su altura llega a presentar temperaturas extremas en algunas regiones. El análisis de este trabajo se llevará a cabo simulando tres escenarios principales y variando parámetros en cada uno de ellos. El primer escenario será variando la temperatura del aire de entrada, el segundo variando la profundidad del pozo y el tercero, variando el material utilizado para el intercambiador de calor. La intención es identificar la relevancia que pueda tener cada uno de estos factores en el aprovechamiento del sistema con las condiciones establecidas por la región.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: En la sección 2 se presentan los tipos, variables y parámetros de los pozos canadienses. En la sección 3 se presenta el modelo matemático que describe la variación de la temperatura del aire dentro de un pozo canadiense debido al intercambio de calor, así como las condiciones de simulación del modelo. Los resultados de la simulación se presentan en la sección 4. Las conclusiones se presentan en la sección 5.

2. Materiales y métodos

2.1. Tipos de configuración de Pozos Canadienses

Existen 3 configuraciones que pueden ser utilizadas para implementar el sistema de pozos canadienses: 1) Anillo, 2) Rejilla y 3) Vertical.

2.1.1. Configuración de Anillo

Consiste en rodear el edificio con la tubería enterrada, es apta para construcciones pequeñas y con poca demanda. Su mayor aplicación es en viviendas familiares y/o construcciones pequeñas. Se aplica este diseño porque resulta rentable y se puede economizar al poder utilizar trincheras existentes en vez de re-excavar. Como se puede ver en la Figura 2, se necesita de un área grande para su instalación, puesto que el sistema rodea la construcción con el tubo como sistema de intercambio de calor. La profundidad de colocación varía entre 1.5 y 3 m. Su instalación está formada por uno o dos tubos, que están direccionados hacia la cámara central, en donde se encuentra el ventilador que impulsa aire en todo el sistema, y esta, a su vez, se conecta directamente a la torre de salida del aire. El material de los tubos puede ser de PVC con chapa de acero (Cabezas, 2013).



Figura 2: Configuración de Anillo (Bruni, 2014).

2.1.2. Configuración de Rejilla

Esta configuración utiliza una red de tuberías enterradas, generalmente se instala en construcciones grandes y cuando se dispone de espacio suficiente. Como se puede ver en la Figura 3, los tubos se colocan en forma de una parrilla y están unidos a dos cámaras de aire (ingreso y salida de aire).



Figura 3: Configuración de Rejilla (Bruni, 2014).

Las tuberías de ingreso de aire son de gran diámetro, mientras que los tubos enterrados, por lo general a 3 m de profundidad, tienen un diámetro menor para lograr disminuir la velocidad de paso del fluido y maximizar el intercambio de energía. Se utiliza cuando el flujo de aire supera los 300 m³/h. El material utilizado para los tubos verticales (ingreso y salida del aire) y los que conforman la rejilla varía dependiendo de los requerimientos del proyecto, pero por lo general pueden ser de PVC y/o de hormigón. El sistema de tubos enterrados debe trabajar en conjunto con una unidad de tratamiento de aire; la cual permite regular el caudal y velocidad de aire necesario, y también ayuda a cubrir las demandas pico de la construcción que no pueden ser satisfechas solo con los tubos enterrados (Cabezas, 2013).

2.1.3. Configuración Vertical

En este tipo de configuración los tubos están dispuestos de forma vertical, lo que permite un mejor drenaje de fluidos y la eliminación de aire atrapado. En sistemas de condensación o evaporación, la orientación vertical permite un flujo más eficiente de condensado o vapor. En algunos diseños, la circulación vertical ayuda a reducir la acumulación de sedimentos. Dependiendo del diseño, pueden ofrecer una eficiencia térmica alta, especialmente en sistemas de convección natural. Son

ideales para instalaciones con restricciones de espacio horizontal. Como se puede ver en la Figura 4, es la configuración más simple y consiste en aplicar una tubería enterrada de forma vertical.

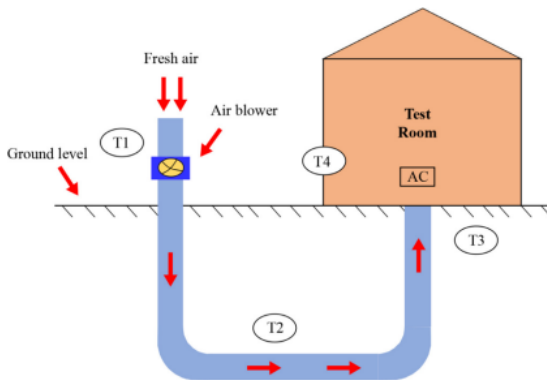


Figura 4: Configuración Vertical (Bruni, 2014).

Esta configuración se utiliza generalmente para grandes construcciones, pero cuando no existe espacio suficiente para utilizar alguna de las opciones mencionadas anteriormente. Consiste en perforaciones verticales por las que se hace pasar la tubería en forma de U, a profundidades entre los 2 y 10 m (del Carmen Esparza Delgado, 2017).

2.2. Componentes de un pozo Canadiense

De manera general, un pozo canadiense utiliza los siguientes componentes (del Carmen Esparza Delgado, 2017):

- **Punto de captación del aire:** se refiere a la toma de aire desde la cual el sistema capta aire del exterior. Se suele instalar a una altura de entre 1 y 1.5 metros sobre el nivel del suelo, para no tomar aire contaminado, por ejemplo, con gas radón. Además, debe contar con una rejilla para evitar la entrada de elementos contaminantes y polución.
- **Filtros:** su función es purificar el aire, evitar la entrada de partículas o proliferación de microorganismos y disminuye la humedad del aire en los conductos.
- **Intercambiador de calor:** se refiere al conjunto de tuberías enterradas donde el aire capta o cede calor al suelo que rodea el conducto. Pueden tener diferente diámetro y longitud en función de las características del suelo, de la profundidad, de la conductividad del terreno y también, de las necesidades energéticas de la vivienda. Cuanto más largo sea el tubo, mayor transferencia térmica se consigue. Los materiales más utilizados son plásticos como el polipropileno, polietileno, PVC, y en menor medida, el hormigón pretensado, cerámica o acero galvanizado. Hay que tener en cuenta que los tubos plásticos son más rápidos y sencillos de instalar que los de hormigón, ya que son mucho más ligeros.
- **Pozo de drenaje:** el agua que se condensa en las tuberías se dirige a este punto para ser eliminado por completo del

sistema y evitar la acumulación de polvo con materia orgánica y humedad que podría dar lugar a la proliferación de hongos y bacterias.

- **Circulador de aire:** su objetivo asegurar la circulación de aire por las tuberías. Para ello pueden utilizarse elementos activos o mecánicos, como ventiladores o extractores, o bien elementos pasivos, como las chimeneas solares. Ambos sistemas pueden ser utilizados simultáneamente ya que su idoneidad varía en función de las condiciones climatológicas.

En la figura 5 se pueden observar los principales componentes que integran el sistema.



Figura 5: Componentes de un sistema de pozos Canadienses (ECONOVA, 2022).

2.3. Variables de un pozo Canadiense

Para el desarrollo y simulación de un modelo matemático que describa el comportamiento de la temperatura del aire que circula por la tubería de un sistema de pozos canadienses, es importante considerar las siguientes variables: a) Ubicación geográfica, b) Temperatura media de la zona, c) Velocidad promedio de viento, d) Tipo de suelo, e) Conductividad térmica del suelo, f) Profundidad y g) Conductividad del material de la tubería. En particular, en este trabajo se harán las siguientes hipótesis, que servirán para plantear el modelo matemático, dejando fuera algunas características que no son relevantes en este análisis y facilitarán la simulación:

1. La densidad y velocidad del aire son las mismas en cualquier sección del tubo.
2. El tipo de suelo es homogéneo; por lo que las características térmicas solo varían con respecto a la profundidad.
3. El aire que circula por el tubo tiene un flujo laminar y solamente circula en una dirección (hacia el interior de la casa).
4. La humedad del suelo es constante y está dada por el tipo de suelo.
5. Solo se evalúa la transferencia de calor por conducción y esta es uniforme en cualquier punto de la tubería.

A continuación se presenta el modelo matemático que describe la variación de la temperatura del aire que circula por un pozo canadiense.

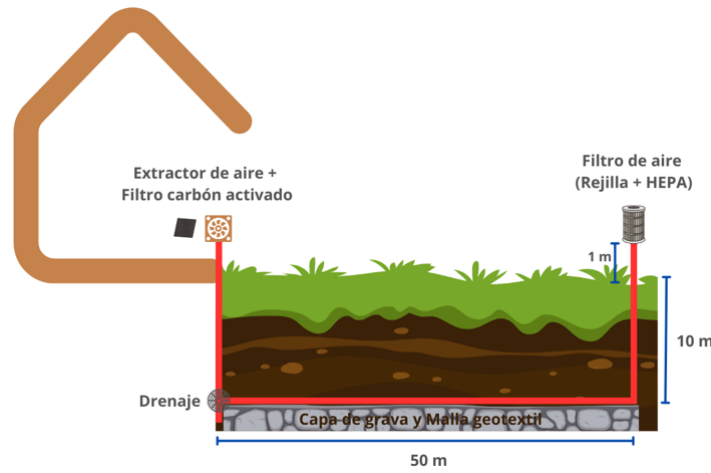


Figura 6: Diseño del pozo canadiense utilizado para la desarrollo del modelo matemático.

3. Modelo matemático

El tipo de configuración de un pozo canadiense está directamente relacionado con las características del terreno y/o tipo de construcción, así como con las condiciones de la misma, pues algunas configuraciones son más eficientes en edificios o viviendas existentes, mientras que para otras resulta más sencillo realizar la instalación desde los cimientos de la construcción. Como se puede ver en la Figura 6, el tipo de configuración que se eligió para poder llevar a cabo el modelado y simulación es una configuración vertical con una tubería de 50 m de longitud y 10 m de profundidad, esto tomando algunas de las características de la experimentación presentada en Soni *et al.* (2015), en la cual se obtuvieron resultados favorables. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estas características son específicas de cada región donde se implementa, y es por eso que se vuelve relevante poder hacer el modelo y simulación en primer lugar y, posteriormente, hacer las adecuaciones necesarias para cada región.

Se sabe que la temperatura puede depender de dos variables: el tiempo y la posición. Sin embargo, para modelar este problema, únicamente se utilizará la posición y así se podrá plantear un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden.

Como se puede ver, en la Figura 7, se busca analizar cómo cambia la energía térmica dentro de la sección de la tubería. Para el planteamiento de este análisis, se considerará que el aire tiene una temperatura inicial conocida T_i , a medida que el aire avanza dentro del tubo, su temperatura cambia debido al intercambio de calor con el suelo, que tiene una temperatura aproximadamente constante T_s y lo que se busca es determinar la temperatura a una distancia x dentro del tubo.

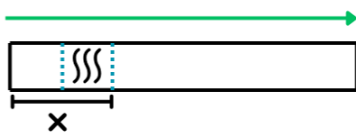


Figura 7: Calor en una sección de la tubería.

Para analizar este proceso, se debe tener en cuenta la primera ley de la termodinámica, que trata sobre la conservación de la energía, así se puede plantear lo siguiente:

$$\text{Energía térmica} = \text{Energía de la tierra} - \text{Pérdidas}.$$

En este sentido, la única fuente de calor es la temperatura de la tierra a cierta profundidad, y considerando que la pérdida de calor está dada por el contacto con el material de la tubería. De esta manera, la variación de la temperatura se puede expresar mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dT}{dx} = Q_g - P_m - P_d, \quad (1)$$

dónde T es la temperatura del aire en la tubería, x es la posición del tubo, Q_g es el calor ganado a cierta profundidad, P_m es la pérdida de calor debido al contacto con el material del tubo y P_d es el calor perdido al subir por el tubo hacia la superficie. Para determinar la temperatura del aire a cierta distancia dentro del tubo, sin considerar la presión ni la densidad del aire, se puede usar la ecuación del calor en una dimensión considerando solo la transferencia de calor por conducción y el efecto del entorno. Por lo que se puede plantear con una ecuación diferencial ordinaria de primer orden, de la siguiente manera:

$$\tau \frac{dT}{dx} + T(x) = \kappa u(x), \quad (2)$$

dónde T es la temperatura del aire en el tubo, x es la distancia del tubo, u es la entrada de calor correspondiente a cierta profundidad de la tierra, τ y κ son los parámetros del modelo asociados a la conductividad térmica para la transferencia de calor. Despejando la ecuación (2), se obtiene:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{\kappa}{\tau} u(x) - \frac{1}{\tau} T(x). \quad (3)$$

La ecuación anterior sigue respetando la primera ley de la termodinámica, pero considera los coeficientes de conductividad térmica asociados al material y a la composición del suelo. Por lo que se puede utilizar para simular y observar la variación de la temperatura del aire dentro de la tubería, agregando las pérdidas correspondientes, que también pueden ser consideradas de primer orden.

Para resolver o simular la Ecuación (3), se utilizará Simulink de MathWorks. La programación por bloques de la Ecuación (3) sin pérdidas se muestra en la Figura 8.

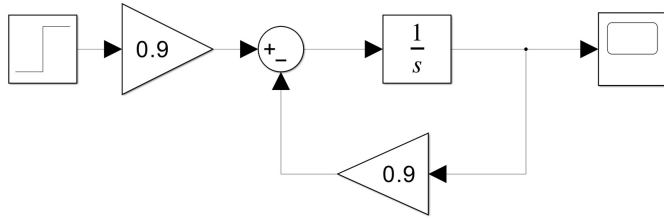


Figura 8: Programación en Simulink por bloques para la solución de la Ecuación (3) sin pérdidas.

Es importante mencionar que, como la Ecuación (3) es de primer orden, y suponiendo que es estable, la solución del modelo, planteado en la Figura 8, alcanzará el único punto equilibrio térmico al igualar al de la fuente de calor, que es la del suelo a cierta profundidad. El diagrama de la Figura 8 no está considerando las pérdidas de calor que podrían llegar a tenerse por el material del tubo o a la salida del tubo cuando el aire debe volver a subir la misma distancia que bajó para alcanzar esa temperatura. Al agregar estas otras dos consideraciones, podemos obtener el planteamiento de la ecuación por bloques como se muestra en la Figura 9.

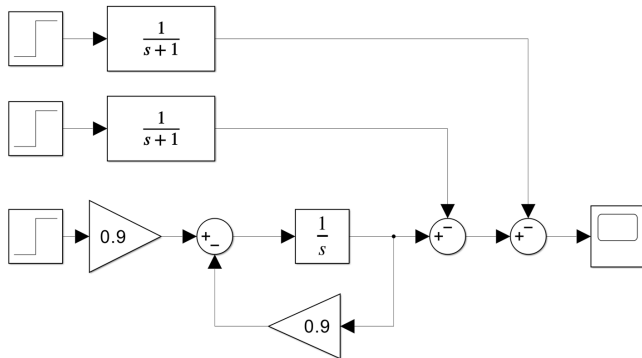


Figura 9: Programación en Simulink por bloques para la solución de la Ecuación (3) con pérdidas.

En el diagrama de bloques de la Figura 9 para la simulación de la variación de la temperatura del aire dentro del pozo canadiense, ya se consideran dos pérdidas relacionadas con el material del tubo y la distancia que recorre el aire para regresar a la superficie después de los 50 m.

En general, el modelo matemático considerado en este trabajo es lineal y descrito por una ecuación diferencial ordinaria de primer orden. En donde sus condiciones de frontera iniciales y finales están determinadas por la temperatura inicial del aire de entrada al provenzal y por el único punto de equilibrio del modelo, respectivamente, donde este último debe coincidir con el equilibrio térmico que se alcance a determinada profundidad de la instalación del provenzal menos las pérdidas existentes en el sistema. En la siguiente sección se presentan los resultados de la simulación del modelo haciendo variaciones en las condiciones iniciales y en los parámetros del modelo.

4. Resultados de la simulación

4.1. Parámetros

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca del suelo que está relacionada con su habilidad para conducir calor y con el movimiento de la energía del calor a través del suelo. El calor se mueve de un área de alta temperatura a un área más fría, distribuyéndose para llegar a un equilibrio. Cuando la conductividad térmica de un suelo es alta, las variaciones de temperatura en la superficie son menores, por ejemplo: un suelo arcilloso y húmedo permite una mejor transferencia térmica que un suelo duro. Los suelos rocosos, arenosos o volcánicos, por el tamaño de las partículas que lo conforman, producen espacios vacíos que generan un menor intercambio de calor Cabezas (2013). Por otro lado, la inercia térmica hace referencia a la capacidad que tiene un determinado material para conservar su temperatura y la velocidad con la que cede o absorbe calor. Se puede decir entonces que la inercia térmica del suelo representa la resistencia de un determinado tipo de suelo al cambio de temperatura; cuanto mayor sea la inercia térmica, menor será el cambio en la temperatura del suelo Arizmendi (2024).

En lo que respecta a la temperatura inicial del aire, en la parte superficial del suelo, para la simulación del modelo, se utiliza la temperatura de Toluca entre 1991 y 2020. En la Tabla 1 se muestra el rango de temperaturas de Toluca consideradas en los escenarios planteados para la simulación.

Tabla 1: Temperatura en Toluca entre 1991 y 2020, (SMN, 2024).

Rango	Temperatura (°C)
Mínimo	-6.7
Promedio	13.4
Máximo	32.2

Por otro lado, en los diferentes escenarios planteados para las simulaciones, se consideran diferentes conductividades térmicas tanto del suelo como del material utilizado en la tubería. En la Tabla 2 se especifican los valores utilizados.

Tabla 2: Conductividades térmicas del suelo y materiales de la tubería, (del Pino Fernández et al., 2023).

Material	Conductividad térmica	(W/mK)
Suelo (Arcilla)	Mínimo	0.9
	Típico	1.7
	Máximo	2.3
Tubería	Hormigón	2.5
	PVC	0.17
	Polietileno de alta densidad	0.52

A continuación se presentan las simulaciones del modelo bajo las diferentes consideraciones planteadas.

4.2. Caso 0: Escenario inicial

Suponiendo una temperatura inicial de 32.2 °C para Toluca, Estado de México, el día 30 de marzo de 2019, tomada de los datos históricos del SMN (Sistema Meteorológico Nacional), una temperatura promedio de la región de Toluca de 13.4 °C, un coeficiente de conductividad térmica mínima del suelo de 0.9 W/mK, para un suelo arcilloso con retención de agua y

utilizando una tubería de hormigón con una conductividad térmica de 2.5 W/mK. El resultado que se obtiene a la salida de esta primera simulación se puede observar en la Figura 10.

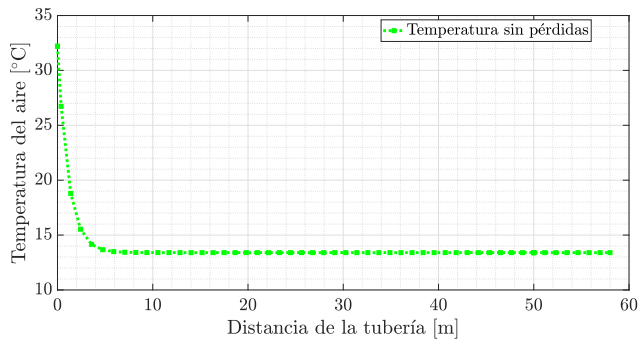


Figura 10: Simulación del comportamiento de la temperatura sin pérdidas.

Como se puede observar en la Figura 10, la temperatura al inicio de la tubería se encuentra a una temperatura inicial de 32.2 °C y esta disminuye hasta alcanzar la temperatura del subsuelo, que corresponde a la temperatura promedio de la región, es decir, 13.4 °C.

Este comportamiento únicamente refleja el escenario ideal, donde la temperatura del aire llega a un equilibrio térmico con la temperatura del suelo dentro del tubo, es decir, no está considerando las pérdidas de calor que podrían llegar a tenerse por el material del tubo o a la salida del tubo cuando el aire debe volver a subir la misma distancia que bajó para alcanzar esa temperatura. El resultado, una vez consideradas estas pérdidas, se puede ver en la Figura 11.

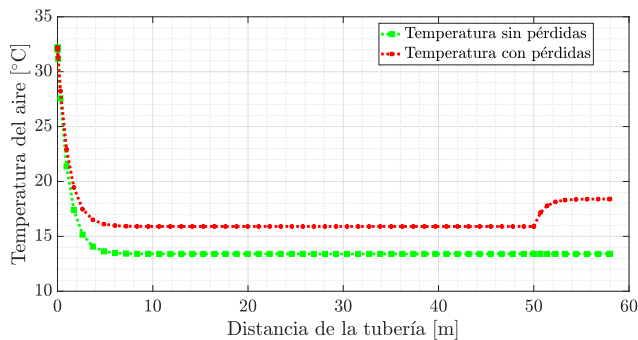


Figura 11: Simulación del comportamiento de la temperatura con pérdidas.

4.3. Caso 1: Variación de la temperatura del aire de entrada

Por otra parte, considerando que el aire que ingresa al sistema es más frío que el que hay debajo de la tierra, se espera obtener una temperatura más cálida a la salida de la tubería. El comportamiento puede representarse suponiendo una temperatura inicial mínima de -6.7 °C, tomando como ejemplo el día 30 de junio de 2010 en la región de Toluca, con un coeficiente de conductividad térmica mínima del suelo de 0.9 W/mK, para un suelo arcilloso con retención de agua. El resultado que obtenemos a la salida de esta simulación se puede observar en la Figura 12.

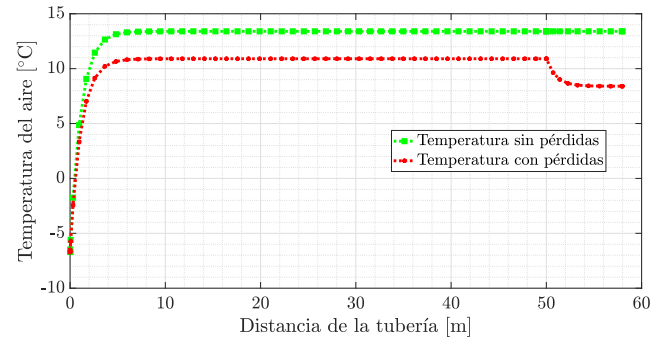


Figura 12: Comportamiento variando la temperatura inicial con y sin pérdidas.

En la figura 13, se puede observar el comportamiento considerando el escenario anterior. Sin embargo, ahora utilizando una conductividad térmica máxima para ese mismo tipo de suelo, es decir, con un valor de 2.3 W/mK.

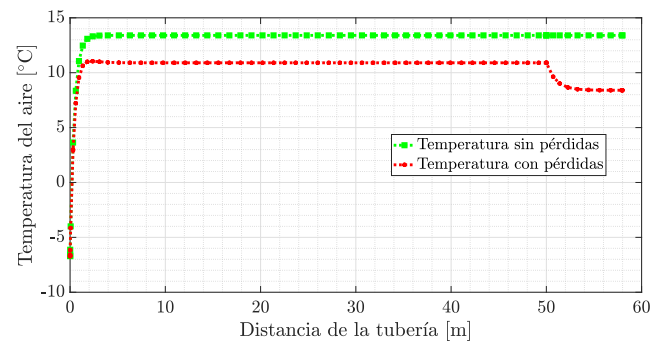


Figura 13: Comportamiento variando la temperatura inicial y conductividad térmica con y sin pérdidas.

Como se puede observar en este caso, se obtiene el mismo resultado a la salida de la tubería, pero se puede notar que se llega al equilibrio térmico en una menor distancia, pues en la Figura 12 el equilibrio térmico se obtiene a una distancia de 8 m aproximadamente, mientras que en la Figura 13, se puede notar que al incrementar la conductividad de la tierra, el equilibrio térmico se logra en los primeros 3 m de distancia.

4.4. Caso 2: Variación de la profundidad del pozo

En el escenario en el cual se varía la profundidad a la que se encuentra la tubería debajo de la tierra, es equivalente a modificar la temperatura de la tierra en dicha profundidad, pues se sabe que a 10 m de profundidad se tiene una temperatura de 13.4 °C. Sin embargo, a una menor profundidad, por ejemplo, a 2 m, es muy probable que a esa distancia tenga una temperatura más cercana a la de la superficie que a la de la temperatura media de la región. En este caso se supondría que esa temperatura a esa profundidad es de 0 °C. En la Figura 14, se puede notar que la temperatura a la salida de la tubería es mucho más fría que en el escenario previo (ver Figura 13).

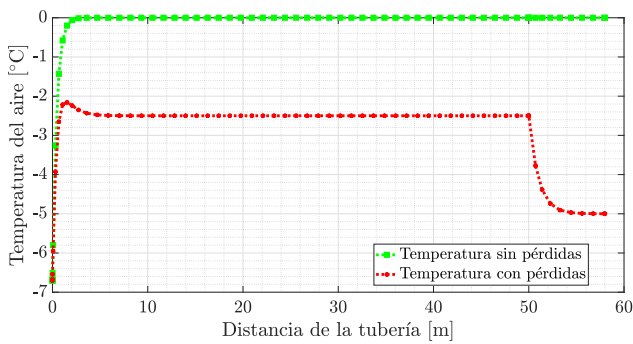


Figura 14: Simulación variando la conductividad térmica del suelo.

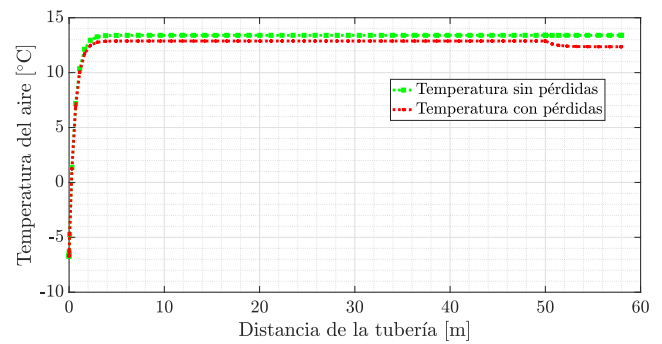


Figura 16: Simulación considerando que el tubo es de PEAD.

4.5. Caso 3: Variación del material del tubo

Para el escenario en el que el material utilizado en la construcción de la tubería es diferente, la variable que se modificó es la conductividad térmica del material. Utilizando ahora PVC con una conductividad térmica de 0.17 W/mK, manteniendo la temperatura inicial de $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y profundidad de 10 m, con conductividad térmica del suelo de 1.7 W/mK. En la Figura 15 se observa que al variar el material del tubo se puede llegar a obtener una temperatura mucho más alta, debido a que el PVC tiene una conductividad térmica menor, lo que permite aislar mejor la temperatura dentro del tubo y perder menos calor en el recorrido del aire.

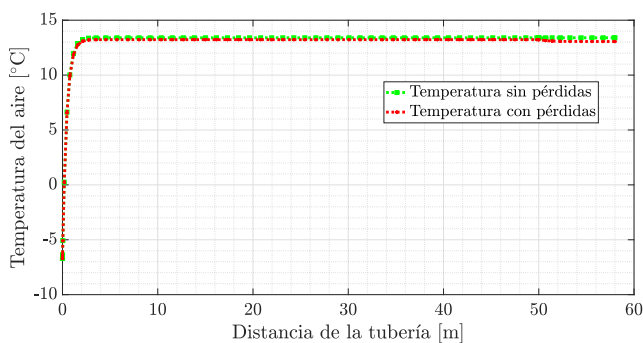


Figura 15: Simulación considerando que el tubo es de PVC.

Otro material que comúnmente es utilizado para la instalación de pozos Canadienses es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), cuya conductividad térmica es de 0.52 W/mK y es un buen aislante térmico en comparación con los metales, por lo que minimiza las pérdidas de calor y mantiene la eficiencia del sistema. Sin embargo, el PVC tiene ventaja en cuanto a costos. En la Figura 16 se muestra la simulación del modelo considerando la conductividad del PEAD.

Analizando los resultados obtenidos en los diferentes escenarios de simulación, podemos observar lo siguiente:

- Una vez que el aire del exterior ingresa en el tubo, la temperatura del ambiente comenzará a cambiar a medida que desciende por la tubería hasta lograr el equilibrio térmico con la temperatura de la tierra que se encuentra alrededor del tubo.
- Esta temperatura puede incrementarse o disminuirse, respetando siempre la segunda ley de la termodinámica, es decir el flujo de calor irá del medio con mayor temperatura al medio con menor temperatura.
- La razón de este intercambio de calor está directamente relacionado con la conductividad térmica de la composición del suelo, es decir entre mayor sea el coeficiente de conductividad térmica del suelo, más rápidamente se llegará al equilibrio térmico.
- En este sentido, al analizar el diseño inicial que se planteó, en donde se tiene una tubería enterrada de 50 m, se puede observar que se estaría desperdiciando 40 m o más de tubería, pues en todos los escenarios el equilibrio térmico se logra antes de los 10 m de longitud.
- Se puede observar que el material juega un papel importante, pues al tener un alto coeficiente de conductividad disipa tan rápido el calor que acabamos perdiendo la temperatura que se había logrado en la tubería a 10 m de profundidad.
- Si la temperatura del exterior es mayor que la del tubo a 10 m de profundidad se tendrán pérdidas con signo positivo, esto significa que el aire volverá a ganar calor antes de salir de la tubería, por el contrario, si el aire del exterior tiene una temperatura menor que la del tubo enterrado, entonces se tendrán pérdidas con signo negativo, es decir el aire perderá calor antes de salir de la tubería.
- La profundidad también juega un papel muy importante, si no es que el más importante, como era de esperarse, pues en la gráfica en la que variamos este factor, se nota que la diferencia de temperatura que se logra a la salida de la tubería disminuye drásticamente.

- El tipo de material utilizado en la tubería debe ser lo suficientemente buen conductor del calor para permitir el intercambio de calor entre la tierra y el aire dentro del tubo. Sin embargo, se debe tener cuidado y tampoco se debe elegir un excelente conductor del calor como el cobre, aluminio o acero inoxidable, porque esto implicaría también una mayor disipación del calor y por lo tanto mayores pérdidas a la salida de la tubería. El PVC y el PEAD son muy buenas opciones, aunque si se evalúa también el costo, el PVC resulta la mejor alternativa.

5. Conclusiones

Los sistemas de pozos canadienses o provenzales, son una tecnología responsable con el medio ambiente, pues su funcionamiento está basado en el aprovechamiento de un recurso natural renovable y prácticamente inagotable, pues el recurso se encuentra disponible todo el día durante todo el año. Es una tecnología accesible para la mayoría de la población, pues su instalación no requiere de elementos demasiado costosos, esto contribuye a reducir la situación de pobreza energética y satisfacer las necesidades de confort térmico en los hogares de México. Se puede afirmar que los sistemas de pozos canadienses ofrecen una alternativa de solución frente a las condiciones de cambio climático y al logro de objetivos sustentables planteados por la ONU.

Antes de instalar el sistema de pozos canadienses, es necesario realizar un estudio previo para evaluar el potencial de operación de un sistema, según la localidad, tipo de clima y tipo de suelo donde se desee instalar, con la finalidad de conocer el posible beneficio (potencial de operación) antes de decidir instalarlo. El incorrecto dimensionamiento de un sistema de pozos canadienses o provenzales podría derivar en un mal funcionamiento o bajo rendimiento del sistema. Es por esto que un sistema de simulación puede beneficiar el análisis previo a la instalación. Si bien la simulación es una excelente opción para analizar el funcionamiento de los pozos canadienses, se

debe alimentar de datos precisos y el mayor número de variables posibles para mostrar resultados confiables y más cercanos a la realidad. En este trabajo se dejaron algunas variables fuera del análisis y, por lo tanto, de la simulación, por lo que trabajos futuros en esa dirección podrían mejorar el análisis, así como también realizar la identificación paramétrica del modelo utilizando datos experimentales reales obtenidos mediante un sistema de medición continua para realizar una validación del modelo y poder obtener resultados más exactos.

Referencias

- Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., y Gómez Melgar, S. (2016). Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. application to very low enthalpy geothermal energy systems. *Sensors*, 16(3):306.
- Arizmendi, A. A. (2024). Modelación de un sistema sustentable para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía por medio de un intercambiador de calor tierra-aire. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- Bruni, S. (2014). La energía geotérmica. *Una nueva serie sobre la innovación de energía*, pp. 1–10.
- Cabezas, A. M. (2013). Eficiencia energética a través de la utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real casa pomaret". *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Cárcel Carrasco, F. J. y Martínez Márquez, D. (2015). La energía geotérmica de baja entalpía. *3C Tecnología*, 4(3):96–108.
- del Carmen Esparza Delgado, M. (2017). Transferencia de calor de un sistema de climatización geotérmica de baja entalpía. *CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS*.
- del Pino Fernández, J., Martínez Bohorquez, M. Á., Andújar-Márquez, J. M., Barragán, A. J., Aquino, A., y Enrique, J. M. (2023). Dimensionado de intercambiadores de calor horizontales enterrados para instalaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía. un caso práctico.
- ECONOVA (2022). Pozo canadiense. *ECONOVA*, pp. <https://econova-institute.com/pozo-canadiense-para-la-calefaccion/>.
- SMN, C. (2024). Reporte del clima en México 2024. *Gobierno de México*.
- Soni, S. K., Pandey, M., y Bartaria, V. N. (2015). Ground coupled heat exchangers: A review and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:83–92.
- Urgilez-González, M. S., González-Redrován, T. J., y Romo-Zamudio, C. E. (2023). Estrategias pasivas por medio de pozos canadienses. *MQRInvestigar*, 7(3):1676–1701.