

**Bombas de Calor Geotérmicas. Diseño de Intercambiadores  
de Calor Verticales Enterrados.**

**MEMORIA**

**Autor: Pablo Schoennenbeck Grohnert**

**Director: Miquel Villarrubia**

**Convocatòria: Primavera 2014**



**Màster Interuniversitari UB-UPC  
d'Enginyeria en Energia**

**Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia**

**Sol·licitud d'acceptació de presentació del Treball Final de Màster i sol·licitud de defensa pública.**

Alumne: Pablo Schoenenbeck Grünert  
DNI: Y2606938-V (NIE)  
Títol: Bombas de Calor Geotèrmicas. Diseño de Intercambiadores de Calor Verticales Enterrados.

Director: Don Miquel Villarubia

**Acceptació de la presentació del Treball:**

Confirmo l'acceptació de la presentació del Treball Final de Màster.

Per a que consti, *Barcelona, 5 Juny 2014*

  
M. Villarubia

Cognoms, nom (director del Treball)

**Sol·licito:**

La defensa pública del meu Treball Final de Màster.

Per a que consti,

  
Cognoms, nom (Alumne)  
Pablo Schoenenbeck Grünert

Barcelona, 06 de Juny de 2014

## Resumen Ejecutivo

Se denominan Bombas de Calor Geotérmicas a los sistemas de climatización que, utilizando la energía renovable en forma de calor contenida en el subsuelo, permiten lograr ratios de eficiencia en el consumo energético mayores que en los sistemas convencionales. El aprovechamiento de esta energía renovable se realiza a través de un intercambiador de calor enterrado (ICE), el cual permite absorber o ceder calor al suelo según el proceso de climatización que se lleve a cabo.

El presente trabajo tiene como objetivo entregar los conceptos teóricos y permitir de manera rápida y sencilla hacer frente al proceso de dimensionado del ICE, lo que resulta esencial en el diseño y en el buen funcionamiento de estos sistemas. Para lograr estos objetivos el trabajo entrega una descripción detallada de los componentes de estos sistemas de climatización, revisa en profundidad los fundamentos teóricos detrás del cálculo de la longitud del intercambiador de calor y presenta un modelo computacional Excel que permite de manera expedita realizar el dimensionamiento del ICE.

La metodología utilizada en el desarrollo del trabajo se basó en primer lugar en una revisión bibliográfica de los sistemas de climatización con bombas de calor geotérmicas. Se utilizaron principalmente documentos desarrollados por la IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association), por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) y por el instituto español IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). Posteriormente y en base a la bibliografía existente se seleccionó el método para el dimensionamiento de los intercambiadores de calor. Este corresponde al método original desarrollado por la ASHRAE y simplificado a través de los trabajos realizados por Bernier, M.A., que a través de funciones correlativas logra simplificar en gran medida los cálculos a ejecutar en el dimensionamiento del ICE. Una vez hecha la revisión bibliográfica y teórica del método de dimensionamiento se procedió a su implementación en Microsoft Excel por tratarse esta de una herramienta computacional ampliamente disponible y difundida. Finalmente se procedió a la validación de la herramienta implementada para lo cual se utilizaron los trabajos realizados por Shonder, J.A., quien ha publicado diversos estudios que comparan distintas herramientas de dimensionamiento presentes en el mercado.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo y herramienta computacional implementados entregan valores de longitud de ICE acorde con los entregados por otros modelos y sistemas computacionales. Se realizaron validaciones tanto para modelos comerciales como residenciales, logrando en el primer caso un resultado 13% mayor y en el segundo caso un 9% mayor, ambos porcentajes respecto del promedio obtenido mediante los otros modelos disponibles. Cabe señalar que el modelo implementado permite el dimensionamiento de perforaciones verticales, quedando excluido el dimensionamiento de sistemas de climatización geotérmica en que el ICE se encuentra instalado horizontalmente.

El presente trabajo permite al lector obtener de manera rápida y sencilla los conocimientos sobre los sistemas de climatización geotérmica y entrega la posibilidad, a través del modelo implementado, de generar un primer dimensionamiento de un caso particular que se desee estudiar. Este último hecho resulta a la vez ser una oportunidad para el lector dado el costo que representa obtener un sistema de dimensionamiento comercial y la mayor dificultad en su uso. Sin embargo se debe tener presente, como ya se señaló, que el estudio abarca únicamente los intercambiadores de calor verticales y que en caso se desee ejecutar un sistema industrial es recomendable el uso de sistemas comerciales.

Mediante el desarrollo del trabajo se ha podido concluir entre otros aspectos que los sistemas de climatización con bombas de calor geotérmicas son una alternativa eficiente en la climatización de viviendas y/o edificios comerciales. El modelo teórico y la herramienta computacional implementada permiten determinar de manera expedita y sencilla el largo de un intercambiador de calor enterrado vertical obteniendo resultados acordes con otros modelos comerciales. Se observó además, a partir de los análisis de sensibilidad realizados, que las variables con mayor efecto en la magnitud del ICE corresponden a aquellas relacionadas con el terreno, esto es, temperatura imperturbable del terreno, conductividad y capacidad térmica de este.

Se señala finalmente como tarea futura a desarrollar para la ampliación del presente trabajo el estudio teórico y la actualización de la herramienta computacional para que permita dimensionar intercambiadores de calor horizontales. Esta posible ampliación tiene su fundamento en el hecho de que los intercambiadores de calor enterrados horizontales suelen utilizarse en sistema de climatización de menor tamaño, como lo pueden ser para una vivienda, y dado que su implementación resulta en un menor costo de inversión inicial.

## Índice de Contenidos

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Introducción .....  | 9  |
| 2.    | Descripción de los Sistemas GSHP .....  | 10 |
| 2.1   | La Bomba de Calor .....   | 11 |
| 2.2   | Sistemas de Conexión .....  | 14 |
| 2.2.1 | Bombas de Calor Acopladas a Tierra (GCHP) .....   | 15 |
| 2.2.2 | Bombas de Calor de Agua Subterránea (GWHP) y Agua Superficial (SWHP).....                                 | 19 |
| 2.3   | Sistema de Distribución de Calor y Refrigeración .....  | 20 |
| 3.    | Dimensionado de Intercambiadores de Calor Verticales.....   | 21 |
| 3.1   | Fundamentos Térmicos del Terreno .....  | 21 |
| 3.1.1 | Evolución de la temperatura con la profundidad .....  | 21 |
| 3.1.2 | Propiedades térmicas del terreno.....   | 22 |
| 3.2   | Rendimiento de la Bomba de Calor .....  | 24 |
| 3.3   | Cálculo de la longitud del intercambiador de calor .....  | 25 |
| 3.3.1 | Correlación para las resistencias térmicas efectivas del terreno $R_{\delta h}$ , $R_{1m}$ y $R_{10y}$ .. | 26 |
| 3.3.2 | Correlación para la Temperatura de Penalización $T_p$ .....   | 28 |
| 3.3.3 | Cálculo de $R_b$ .....  | 29 |
| 4.    | Implementación del modelo .....   | 32 |
| 4.1   | Configuración de Perforaciones .....  | 32 |
| 4.2   | Selección de Tuberías y Fluido .....  | 33 |
| 4.3   | Selección de las propiedades térmicas del terreno .....   | 34 |
| 4.4   | Ingreso de las Cargas Térmicas del Edificio.....  | 35 |
| 4.4.1 | Método Directo .....  | 36 |
| 4.4.2 | Método de los Grados Día.....   | 37 |
| 4.5   | Configuración de la Bomba de Calor.....   | 39 |
| 4.5.1 | Cálculo de cargas al terreno por método directo .....   | 40 |
| 4.5.2 | Cálculo de cargas al terreno por método de los grados día.....  | 41 |
| 4.6   | Resultados .....  | 42 |
| 5.    | Validación del Modelo.....  | 43 |
| 5.1   | Caso 1. Aplicación Comercial. Maxey Elementary School.....  | 43 |
| 5.1.1 | Descripción y datos de modelación .....   | 43 |
| 5.1.2 | Resultados .....  | 45 |
| 5.1.3 | Análisis de Sensibilidad .....  | 46 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.2   | Caso 2. Aplicación Residencial. Residencia en Fort Polk ..... | 47 |
| 5.2.1 | Descripción y datos de modelación .....                       | 47 |
| 5.2.2 | Resultados .....  | 49 |
| 5.2.3 | Análisis de Sensibilidad .....                                | 50 |
| 6.    | Conclusiones.....   | 52 |
| 7.    | Referencias.....  | 53 |
| 8.    | Anexos.....   | 55 |
| 8.1   | Anexo 1.....  | 55 |
| 8.2   | Anexo 2.....  | 56 |

## Índice de Ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1: Esquema del funcionamiento de una bomba de calor geotérmica .....                | 10 |
| Ilustración 2: Componentes Principales de un sistema GSHP.....                                  | 10 |
| Ilustración 3: Resumen Componentes Principales en un Sistema GSHP .....                         | 11 |
| Ilustración 4: Unidad de Bomba de Calor Típica .....  | 12 |
| Ilustración 5: Ciclo frigorífico de la bomba de calor.....                                      | 13 |
| Ilustración 6: Ciclo básico de calefacción/refrigeración.....                                   | 14 |
| Ilustración 7: Sistema GCHP, con intercambiador de calor vertical.....                          | 15 |
| Ilustración 8: Flujo en serie/paralelo en configuración vertical.....                           | 16 |
| Ilustración 9: Tipos de tubería a instalar.....   | 16 |
| Ilustración 10: Sistema GCHP con intercambiador de calor horizontal .....                       | 17 |
| Ilustración 11: Distintas configuraciones para sistema GHX.....                                 | 17 |
| Ilustración 12: Flujo en serie/paralelo configuración horizontal .....                          | 18 |
| Ilustración 13: Sistema GWHP [1] .....  | 19 |
| Ilustración 14: Sistemas SWHP [1] .....   | 19 |
| Ilustración 15: Variación de la temperatura de la tierra con la profundidad a lo largo del año. | 21 |
| Ilustración 16: Pulsos Térmicos Sucesivos al Terreno .....                                      | 26 |
| Ilustración 17: Sección transversal de perforación .....  | 29 |
| Ilustración 18: Pantalla Configuración de Perforaciones .....                                   | 32 |
| Ilustración 19: Pantalla Selección de Tubería y Fluido .....                                    | 34 |
| Ilustración 20: Pantalla Selección del Terreno .....  | 35 |
| Ilustración 21: Pantalla Ingreso Tipo Suelo .....   | 35 |
| Ilustración 22: Pantalla Selección Método Ingreso de Cargas Térmicas.....                       | 35 |
| Ilustración 23: Pantalla Ingreso Cargas Térmicas – Método Directo .....                         | 36 |
| Ilustración 24: Pantalla Ingreso Cargas Térmicas – Método Grados Día .....                      | 39 |
| Ilustración 25: Pantalla Configuración Bomba de Calor.....                                      | 42 |
| Ilustración 26: Pantalla Resultados .....   | 42 |
| Ilustración 27: Variación Porcentual de la Longitud Total de Perforación .....                  | 46 |
| Ilustración 28: Variación Porcentual de la Longitud Total de Perforación .....                  | 50 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos suelos..... | 24 |
| Tabla 2: Coeficientes de correlación para $f_6h$ , $f_{1m}$ y $f_{10y}$ .....    | 27 |
| Tabla 3: Propiedades Físicas de los Fluidos.....                                 | 34 |
| Tabla 4: Datos Maxey Elementary School ingresados al modelo .....                | 44 |
| Tabla 5: Cargas Térmicas de Maxey Elementary School .....                        | 45 |
| Tabla 6: Principales resultados Caso 1 .....                                     | 45 |
| Tabla 7: Datos Residencia Fort Polk ingresados al modelo.....                    | 48 |
| Tabla 8: Cargas Térmicas de Residencia Fort Polk .....                           | 49 |
| Tabla 9: Principales resultados Caso 2 .....                                     | 49 |

## 1. Introducción

El sistema de climatización con Bomba de Calor Geotérmica (*Ground Source Heat Pumps, GSHP, por sus siglas en inglés*) es una tecnología de energía renovable altamente eficiente, debido a que transfiere calor con una temperatura estable presente en el subsuelo. Actualmente esta tecnología puede ser considerada como madura y no presenta mayores barreras técnicas para su implementación. Además, sus costos de operación y mantenimiento suelen ser menores que en los sistemas convencionales de climatización, pudiendo alcanzar un 70% de ahorro en el caso de calefacción y un 50% en el caso de refrigeración o aire acondicionado. Sin embargo y a pesar de que estos sistemas se encuentran en la mayor parte de los países industrializados, en donde los requerimientos de climatización son elevados, su mayor barrera de penetración se basa en sus elevados costos iniciales de implementación los cuales pueden ser el doble que en un sistema convencional de climatización. [1]

Una de las etapas esenciales en el diseño de un sistema GSHP corresponde al dimensionado del intercambiador de calor enterrado (ICE), la cual nos entregará el largo de las perforaciones requeridas para que el sistema tenga la capacidad de responder frente a las cargas térmicas de calefacción y refrigeración requeridas por la vivienda o edificio. El presente trabajo busca entregar los conceptos, junto a una herramienta computacional, que permitan hacer frente al proceso de dimensionado del ICE. Para esto se realiza en primer lugar una descripción de los distintos sistemas de bomba de calor geotérmica, identificando las partes del sistema y analizando sus ventajas y desventajas en función de la naturaleza de la instalación. El tercer capítulo presenta los conceptos teóricos involucrados en el dimensionado del intercambiador de calor enterrado, los cuales se basan principalmente en las cargas térmicas de edificio o vivienda que se desea climatizar, las características de la bomba de calor y las condiciones del terreno que se utilizará para la instalación del intercambiador de calor. Posteriormente, en el cuarto y quinto capítulo se desarrolla, respectivamente, el modelo computacional que permite el dimensionado del intercambiador y su validación mediante dos casos reales.

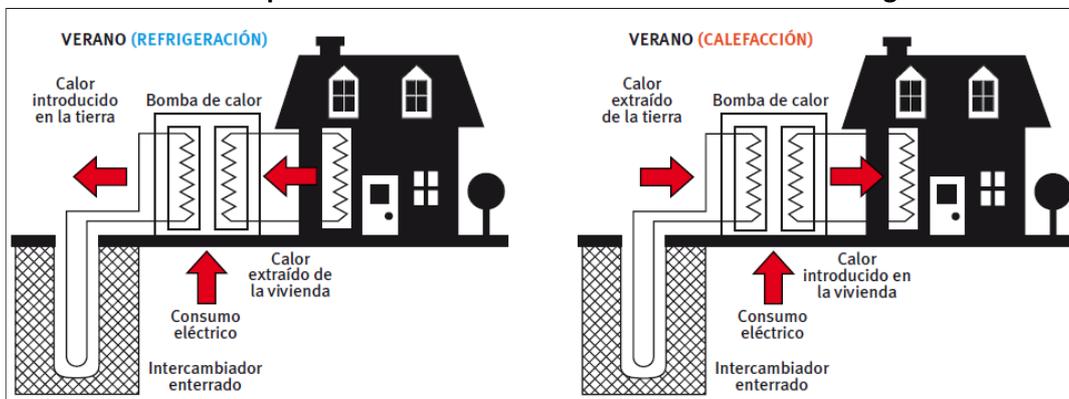
El modelo implementado corresponde al utilizado por la ASHRAE, con algunas simplificaciones a través de funciones correlativas, que permiten disminuir la cantidad y dificultad de los cálculos. Los resultados obtenidos muestran que el modelo y herramienta computacional implementados entregan valores de longitud de ICE acorde con los entregados por otros modelos y sistemas computacionales. Cabe señalar que el presente modelo permite el dimensionamiento de perforaciones verticales, quedando excluido el dimensionamiento de sistemas de climatización geotérmica en que el ICE se encuentra instalado horizontalmente.

A modo general se puede señalar que los sistemas GSHP suelen ser más eficientes ya que son capaces de proveer ambos medios de climatización mientras que los sistemas convencionales requieren de equipos diferentes para la calefacción y refrigeración de la vivienda. Otras variables como el precio de la energía, el tipo de clima y la naturaleza del proyecto también afectarán lo favorable o no que sea la implantación de un sistema GSHP.

## 2. Descripción de los Sistemas GSHP

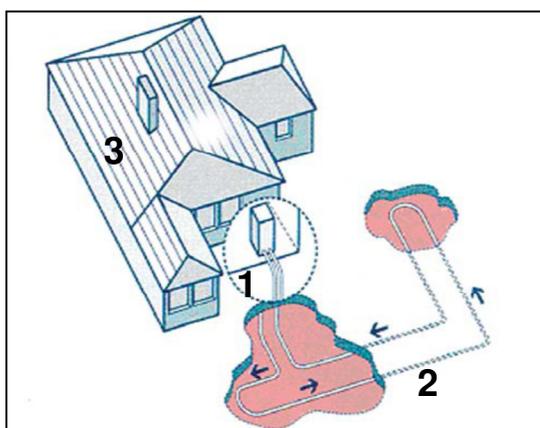
La bomba de calor es una máquina que transfiere calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. La bomba de calor por tanto, tiene la capacidad de aprovechar la energía existente en el ambiente ya sea en el aire, en el agua o en la tierra (foco frío) y permitir calefaccionar el interior de un edificio (foco caliente) con una utilización relativamente pequeña de energía eléctrica. En caso de que la transferencia de calor se realice en modo inverso, es decir desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a una temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración. Es así como la bomba de calor geotérmica extrae energía térmica del suelo en invierno para transferirla al interior mientras que en verano extraerá calor del interior para transferirlo al terreno.

**Ilustración 1: Esquema del funcionamiento de una bomba de calor geotérmica**



**Fuente:** Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]

Un sistema de bomba de calor geotérmica tiene tres componentes principales: una bomba de calor, una conexión a tierra y un sistema interior de distribución de calor o frío. (Ver **Ilustración 2**). Estas tres componentes principales junto a las distintas configuraciones para la conexión a tierra en un sistema GSHP serán explicadas en las secciones siguientes.



**Ilustración 2: Componentes Principales de un sistema GSHP**

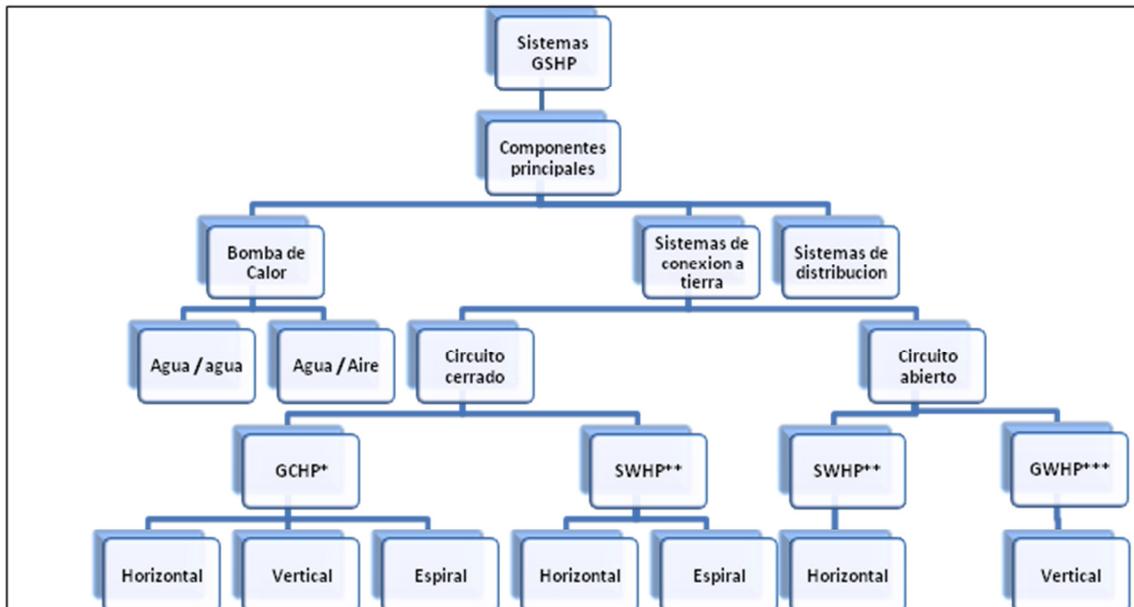
Los tres componentes principales del sistema de Geotérmicos:

- (1) Bomba de calor,
- (2) Conexión a tierra, y
- (3) Sistema de distribución calefacción/refrigeración.

**Fuente:** Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]

En la figura a continuación se distinguen los tipos de conexión a tierra que se pueden efectuar, cuya elección dependerá entre otras variables, de la superficie de tierra disponible y de las condiciones del lugar donde se instalará el sistema.

**Ilustración 3: Resumen Componentes Principales en un Sistema GSHP**



**Fuente:** *Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]*

\* GCHP, Bombas de calor acopladas en tierra, \*\* SWHP, Bombas de calor en agua superficial, \*\*\* GWHP, Bombas de calor en agua subterránea

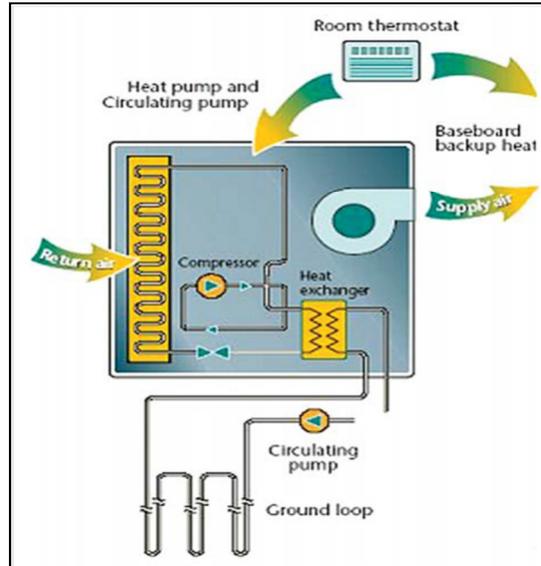
## 2.1 La Bomba de Calor

La bomba de calor constituye la unidad básica en un sistema GSHP, y como se señaló, cumple la función de transferir el calor entre el sistema de distribución de calefacción/refrigeración con la conexión a tierra.

La bomba de calor más común utilizada en estos sistemas es la unidad del tipo agua/aire. Esta designación indica que el líquido que transporta el calor desde y hacia la conexión con la tierra es agua, o agua con un anticongelante, y que el sistema de distribución en el interior del edificio se basa en aire caliente o frío. El rango de potencia de las unidades utilizadas abarca desde los 3,5 kW hasta los 35 kW de capacidad de refrigeración.

Todos los componentes que conforman una bomba de calor se encuentran situados en un gabinete. Estos son: un compresor, un intercambiador de calor entre un refrigerante y el agua de la conexión a tierra, un intercambiador de calor entre el aire y el líquido refrigerante, un sistema de distribución de aire con el ducto del ventilador, controladores y un sistema de colección de condensados en caso de aplicarse como refrigeración. Una unidad de bomba de calor típica se puede apreciar en la **Ilustración 4**.

#### Ilustración 4: Unidad de Bomba de Calor Típica



**Fuente:** *Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]*

Para aplicaciones residenciales y pequeños sistemas comerciales, será necesaria y suficiente, una única bomba de calor para operar el sistema. Sin embargo, para sistemas comerciales, institucionales o industriales más grandes, se requerirá instalar un conjunto de bombas de calor conectadas a un sistema común de fluido y transferencia de calor.

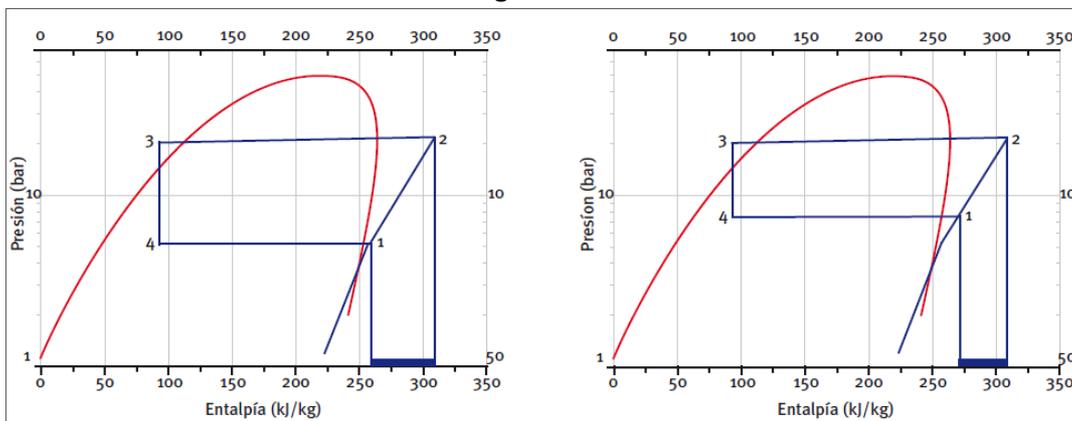
El funcionamiento de la bomba de calor en modo de calefacción es el siguiente: el calor proveniente de la conexión a tierra es transportado por el agua hacia arriba, a un intercambiador de calor, en donde se transfiere esta energía al líquido refrigerante, este componente se denomina evaporador. Anterior al proceso de transferencia de calor, el líquido refrigerante se encuentra en fase líquida, pero al estar este más frío que el agua proveniente de la conexión a tierra, este último líquido libera calor cediéndoselo al refrigerante el cual pasará a fase gaseosa, sin embargo su temperatura y presión no serán muy elevadas. Es necesario por lo tanto, que este gas a baja temperatura y presión, sea ingresado a un compresor el cual elevará la presión del gas y por lo tanto su temperatura. Posteriormente, el gas refrigerante a presión y temperatura elevada, es llevado a un segundo intercambiador de calor llamado condensador.

En el caso de bombas de calor agua/aire, un ventilador sopla aire que será calentado en el condensador debido a la alta temperatura del refrigerante. Para el caso de bombas de calor agua/agua será el agua, que circula en el sistema de distribución de calor del edificio, la que adquirirá el calor del refrigerante que se encuentra a mayor temperatura. Dado que el refrigerante cederá calor, ya sea al aire o agua circulante, su temperatura descenderá y por lo tanto condensará. Finalmente el líquido refrigerante al salir del condensador pasa a través de una válvula de expansión. Esta válvula reduce la presión del refrigerante y por lo tanto su temperatura desciende significativamente. De este modo, el líquido refrigerante fluye al evaporador en donde el ciclo comienza nuevamente. Es así como el calor contenido en el agua (u otro líquido que transfiera el calor) de la conexión a tierra es transferido al aire o agua del

sistema de distribución de calor/frío en el edificio. De aquí los nombres bombas de calor agua/aire o bombas de calor agua/agua.

La potencia calorífica o frigorífica de la bomba de calor así como su eficiencia energética (COP, Coefficient of Performance, ratio entre la potencia suministrada por la bomba y el consumo eléctrico requerido para suministrar dicha potencia) pueden variar según su temperatura de trabajo. En las gráficas a continuación podemos observar, para una bomba de calor trabajando en modo calefacción, la base física de la relación temperatura-prestaciones. En la gráfica a la izquierda se puede observar el aumento de entalpía del refrigerante en la etapa de compresión [1-2], que corresponde al trabajo del compresor. De lograrse un aumento de la temperatura de evaporación, y por tanto de la presión, el compresor debe realizar un menor trabajo para obtener la misma presión final (y por tanto temperatura), como puede ser observado en la gráfica de la derecha. En refrigeración se puede lograr este ahorro de energía del mismo modo bajando la temperatura del condensador. Este hecho implica por lo tanto, un aumento de la eficiencia energética de la bomba de calor y consecuentemente un menor consumo energético dedicado a la climatización de un edificio o vivienda. En definitiva, al estar la bomba de calor conectada a tierra, una buena parte del calor que se está utilizando en la aplicación proviene de la energía térmica renovable contenida en el suelo la cual en la mayoría de los casos es más favorable que la contenida en el aire.

**Ilustración 5: Ciclo frigorífico de la bomba de calor**

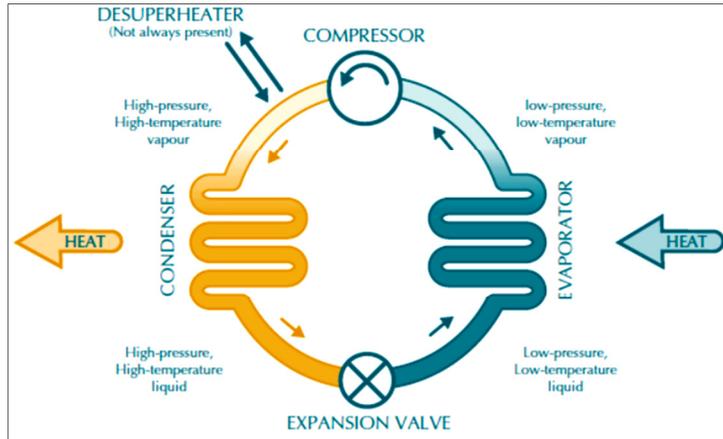


**Fuente:** *Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]*

Una diferencia fundamental entre una bomba de calor geotérmica y un refrigerador es que la primera puede funcionar en ambos sentidos. Es decir, cuando se requiere de refrigeración o aire acondicionado, el evaporador se convierte en condensador y viceversa. Esto se logra mediante una válvula al interior de la bomba de calor que permite la reversibilidad del sistema.

Una posible aplicación extra a incluir en un ciclo de calefacción o refrigeración se basa en la instalación de un tercer intercambiador de calor que permita extraer el calor en exceso existente a la salida del compresor. Básicamente se trata de aprovechar este calor para que permita elevar la temperatura del agua en el sistema de red de la vivienda. Esta aplicación (*“desuperheater”*), y la configuración general del ciclo de calefacción/refrigeración puede ser observada en la siguiente figura.

**Ilustración 6: Ciclo básico de calefacción/refrigeración**



*Fuente: Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]*

## 2.2 Sistemas de Conexión

La conexión a tierra o intercambiador de calor enterrado es donde se produce la transferencia de calor entre el sistema y el suelo. Los GSHP comprenden una amplia variedad de sistemas que utilizan la tierra, el agua subterránea o el agua superficial como una fuente y sumidero de calor. Un tipo común de conexión a tierra implica las tuberías enterradas en fosas horizontales o verticales, o alternativamente, sumergidas en un lago o estanque. Agua, una mezcla de agua y anticongelante u otro fluido de transferencia de calor se distribuye desde la bomba de calor, a través de las tuberías y nuevamente de vuelta a la bomba de calor en un "circuito cerrado". En un "circuito abierto", las conexiones en la tierra sacan agua de un pozo o un cuerpo de agua, a la cual se le entrega o extrae calor retornando posteriormente a este cuerpo de agua.

La siguiente nomenclatura ha sido adoptada por la sociedad americana de ingenieros de calefacción, refrigeración y aire acondicionado (ASHRAE), para distinguir entre los distintos tipos de sistemas de conexión a tierra, indistintos del circuito que utilicen:

- **Bombas de calor acoplado a tierra (GCHPs):** utiliza el suelo como una fuente de calor y sumidero, ya sea con intercambiadores de calor de tierra verticales u horizontales (GHXs).
- **Bombas de calor de agua subterránea (GWHPs):** utiliza agua subterránea (acuíferos) como una fuente de calor y sumidero.
- **Bombas de calor para agua superficial (SWHPs):** uso de masas de agua superficial (Lagos, estanques, etc.) como una fuente de calor y sumidero.

Debido a que es difícil de acceder a las conexiones a tierra en un sistema GSHP después de su instalación, los materiales y mano de obra utilizados en su construcción deben ser de la más alta calidad. Se utiliza casi exclusivamente tubería de polietileno de alta densidad y conexiones de tubería por fusión. Los instaladores deben ser experimentados y utilizar equipos especializados para generar los espacios donde se colocaran las tuberías en la tierra o en cuerpos de agua.

### 2.2.1 Bombas de Calor Acopladas a Tierra (GCHP)

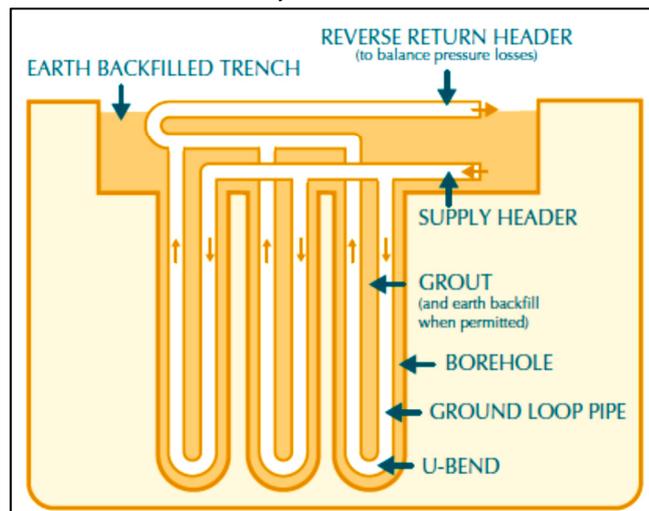
En un sistema de bomba de calor acoplada a tierra (Ground Coupled Heat Pump, GCHP), se tienen una serie de tuberías enterradas por donde fluye un fluido de transferencia de calor en un circuito cerrado. El líquido nunca deja el sistema, sino más bien, viaja hacia adelante y hacia atrás en el circuito entre la conexión a tierra y la bomba de calor. El fluido circulante puede ser agua, la cual puede contener o no una solución de anticongelante, dependiendo de las temperaturas que se tendrán en el lugar de instalación. El intercambiador de calor en la tierra puede hacer uso de una serie de perforaciones verticales profundas (pozos) o un arreglo horizontal de tubos enterrados a unos pocos metros debajo de la superficie.

#### *Intercambiadores de calor verticales*

Los intercambiadores de calor verticales son idóneos para edificios grandes donde la base rocosa está cerca de la superficie, cuando se desea una interrupción mínima del terreno o donde no se disponga de mucho terreno para la instalación (*Ver Ilustración 7*). Debido a que la temperatura del suelo es constante durante todo el año por debajo de la superficie, los GHX verticales son más eficientes que GHX horizontales, los cuales pueden experimentar fluctuaciones estacionales de temperatura.

Los circuitos verticales son generalmente más caros en la instalación que los horizontales, pero requieren menos tubería debido a las temperaturas estables. Los pozos, de 45 a 150 m de profundidad, son perforados por las plataformas que se utilizan normalmente para la perforación de pozos. Contienen uno o dos circuitos de tubo con un codo en la parte inferior. Después que la tubería es insertada, el agujero es rellenado con mortero lo cual evita que aguas superficiales o subterráneas entren en el pozo. Después de rellenar y enlechar, los tubos verticales se conectan con tubos de distribución horizontales tanto de ida como de retorno a la bomba de calor.

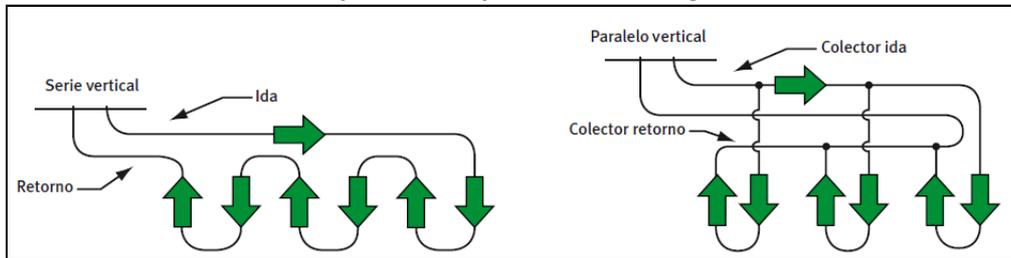
**Ilustración 7: Sistema GCHP, con intercambiador de calor vertical**



*Fuente: Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]*

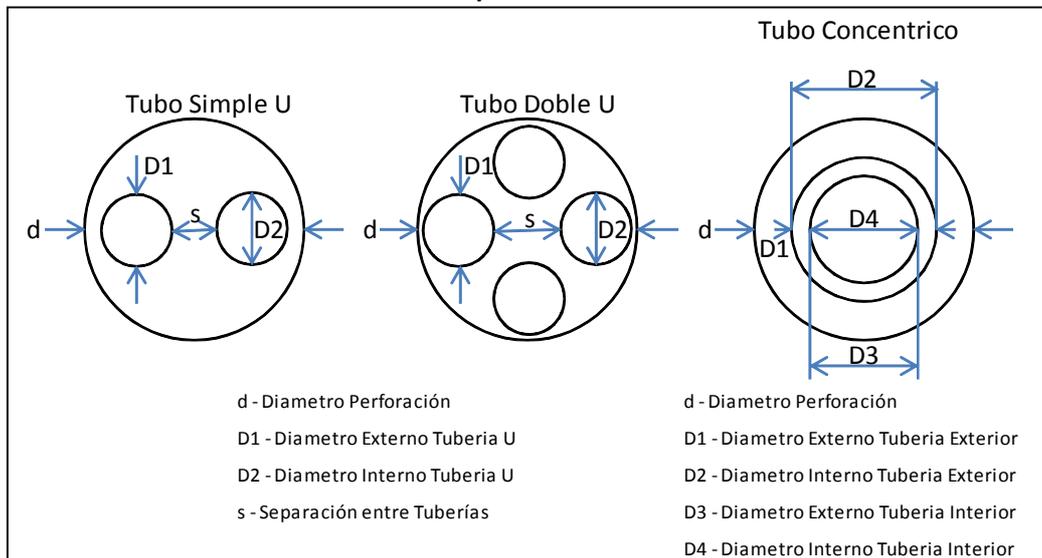
Las configuraciones más usuales en los intercambiadores de calor verticales se clasifican según el tipo de tubería instalada (simple U, doble U, coaxial) y según la trayectoria del fluido (serie, paralelo). A continuación se muestran los esquemas que representan gráficamente dichas configuraciones.

**Ilustración 8: Flujo en serie/paralelo en configuración vertical**



**Fuente:** Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]

**Ilustración 9: Tipos de tubería a instalar**



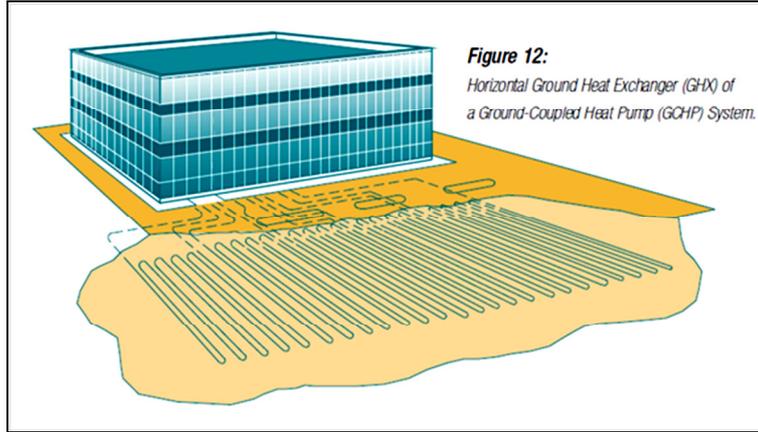
**Fuente:** Elaboración Propia.

Finalmente, en el diseño de la tipología del intercambiador de calor vertical se deberá tener en cuenta la cantidad y profundidad de las perforaciones, además de la separación entre estas ya que esto influirá en la resistencia térmica del terreno debido a la interacción que se produce entre las perforaciones en la transferencia del calor desde la tubería al terreno.

### **Intercambiadores de calor horizontales**

Los intercambiadores de calor horizontales suelen ser menos costosos de instalar que la disposición vertical, pero requieren de una superficie de terreno más grande para su instalación (Ver **Ilustración 10**). Por esta razón, es generalmente más apta para aplicaciones más pequeñas tales como residencias y pequeños edificios comerciales. Puede ser especialmente atractivo si el equipo para hacer la excavación y el zanjado está disponible y cuando los pocos metros superiores de la tierra son fáciles de excavar.

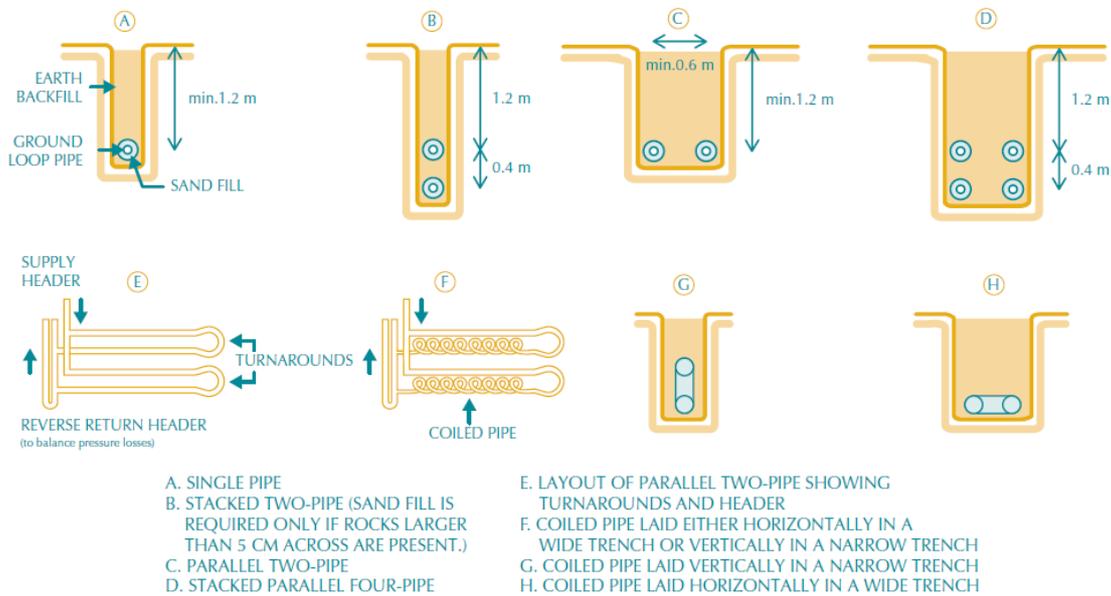
**Ilustración 10: Sistema GCHP con intercambiador de calor horizontal**



**Fuente:** Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]

Un GHX horizontal consta de una serie de tuberías en trincheras, generalmente uno o dos metros bajo la superficie. Normalmente se instalan cerca de 35 a 55 metros de tubería por kW de capacidad de calefacción y refrigeración. Son posibles muchas configuraciones para un sistema GHX horizontal, como se muestra en la **Ilustración 11**. Cuando el área es limitada un tubo en espiral, o también llamado "slinky", puede ser utilizado para montar una mayor cantidad de metros en una misma zona. Mientras esto reduce la cantidad de superficie utilizada, al mismo tiempo se requiere más tubería, lo que resulta en costos adicionales. La fosa es rellenada una vez que el tubo ha sido establecido.

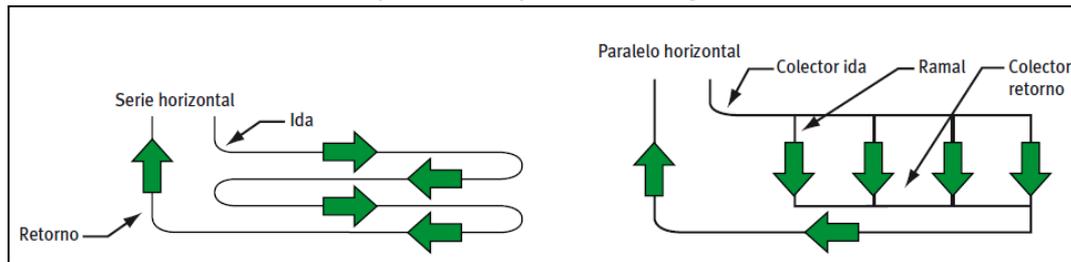
**Ilustración 11: Distintas configuraciones para sistema GHX**



**Fuente:** Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International. [1]

Al igual que en la configuración vertical, los intercambiadores horizontales pueden configurarse con la trayectoria del fluido en serie o en paralelo como puede observarse en la siguiente figura.

### Ilustración 12: Flujo en serie/paralelo configuración horizontal



**Fuente:** Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]

La elección del modo de circulación del fluido, tanto para los sistemas verticales como para los horizontales, se realizará teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de ambas configuraciones que se detallan a continuación. Además, en el diseño de la tipología se deberá tener en cuenta la profundidad y el número de zanjas y el espacio entre las sondas en cada zanja.

- Ventajas del sistema en serie
  - La trayectoria del fluido está perfectamente definida
  - El aire atrapado puede ser eliminado con gran facilidad
  - Funcionamiento térmico más alto por metro lineal dado que se requiere de un diámetro superior de tubería.
- Desventajas del sistema en serie
  - Se necesita un diámetro mayor para la tubería lo que implica una mayor cantidad de fluido aumentando el costo de instalación
  - Longitud limitada debido a la caída de presión del fluido
- Ventajas del sistema en paralelo
  - Costo de instalación más bajo al requerirse un menor diámetro de tubería y por tanto un menor cantidad de fluido
- Desventajas del sistema en paralelo
  - Mayor dificultad para la purga del sistema
  - Dificultad para equilibrar correctamente los flujos en los distintos bucles del sistema

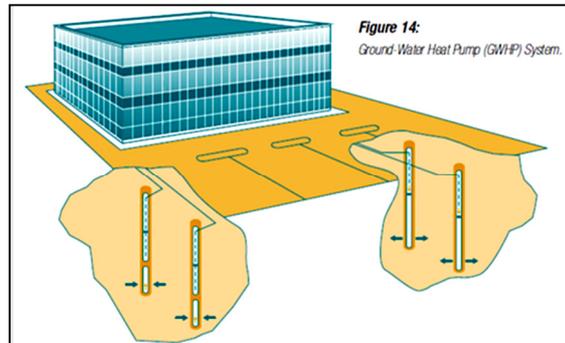
## 2.2.2 Bombas de Calor de Agua Subterránea (GWHP) y Agua Superficial (SWHP)

Los sistemas GWHP a diferencia de los GCHP son sistemas de lazo abierto, es decir, utilizan un suministro constante de agua subterránea como fluido de transferencia de calor (Ver **Figura 13**).

Una conexión de tierra GWHP consiste simplemente en pozos en donde el agua subterránea de un acuífero se bombea hacia la conexión del intercambiador de calor tierra - refrigerante en la bomba de calor, o a un intercambiador de calor intermedio. El intercambiador intermedio transfiere el calor del circuito abierto de agua subterránea a un circuito cerrado en el edificio, y por lo tanto,

aísla la bomba del agua del pozo permitiendo proteger el intercambiador de ensuciamiento o de agua abrasiva proveniente del pozo. Después de dejar el edificio, el agua es bombeada hacia el mismo acuífero a través de un segundo pozo, llamado también pozo de inyección.

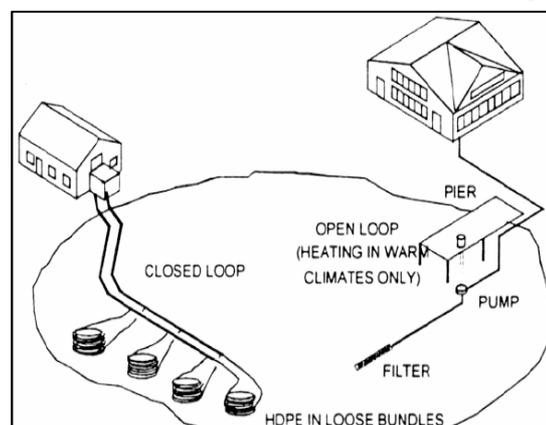
**Ilustración 13: Sistema GWHP [1]**



El GWHP fue el primer tipo de GSHP en aparecer en el mercado y ha sido utilizado con éxito durante décadas. Son el tipo de sistema más simple para instalar. Sin embargo, las regulaciones ambientales locales y la insuficiente disponibilidad de agua pueden limitar su uso en algunas áreas. Los pozos de columna fija son una variación más reciente del sistema GWHP. Estos pozos son normalmente de seis pulgadas de diámetro y pueden llegar hasta una profunda de 450 m. En este sistema, el agua desde el fondo del pozo se bombea al intercambiador de calor del edificio y se devuelve a la parte superior del mismo pozo. El pozo también puede proporcionar agua potable. Para que este sistema trabaje adecuadamente, se debe tener agua subterránea en abundancia. Este tipo de sistema no se utiliza cuando el agua está muy profunda, ya que la potencia requerida por la bomba para extraer esta agua sería muy grande y los costes serían muy altos.

Por otra parte, las bombas de calor de agua superficial son una opción viable y un sistema GSHP relativamente de bajo costo. Una serie de tubos en espiral sumergidos debajo de la superficie de un lago o estanque sirve como el intercambiador de calor. Este sistema requiere mínima tubería y excavación, pero el estanque o lago debe ser lo suficientemente grande y profundo. El fluido de transferencia de calor es bombeado a través de la tubería en un circuito cerrado, como en un sistema GCHP, evitando los impactos adversos en un ecosistema acuático.

**Ilustración 14: Sistemas SWHP [1]**



### **2.3 Sistema de Distribución de Calor y Refrigeración**

El sistema de calefacción/refrigeración distribuye el calor o frío desde la bomba de calor hacia la construcción o vivienda que se desea climatizar. Por lo general, la distribución de calor o frío se basa en un sistema de ductos de aire, aunque dicha distribución puede ser realizada por sistemas en base a un líquido (agua) el cual climatizará a través de radiadores ubicados en paredes o suelos. Por lo general los sistemas de distribución de calor/frío son los mismos a los utilizados en sistemas convencionales, los cuales son bien conocidos y documentados.

Por ejemplo, un sistema de distribución en base a aire contará con ductos de aire, fancoils, difusores, entradas de aire fresco y componentes de control (termostato entre otros). Un sistema de distribución en base agua en cambio, contará con un circuito de cañerías que permitirá el flujo del agua caliente desde la bomba de calor hacia los distintos intercambiadores de calor (radiadores en paredes o suelo radiante) que puedan ser instalados en la vivienda. Del mismo modo habrá un circuito que permitirá trasladar el fluido que ya ha cedido su calor en los intercambiadores hacia la bomba de calor y de este modo reiniciar el ciclo.

Cabe señalar que los suelos de tipo radiante son uno de los sistemas actuales de mayor eficacia y que producen mayor confort a los usuarios si están bien diseñados y construidos. Dadas las menores temperaturas requeridas en este tipo de sistema de distribución (debido a una mayor área de intercambio de calor), la implementación de una bomba de calor geotérmica para este tipo de sistema implica altas eficiencias de operación.

### 3. Dimensionado de Intercambiadores de Calor Verticales

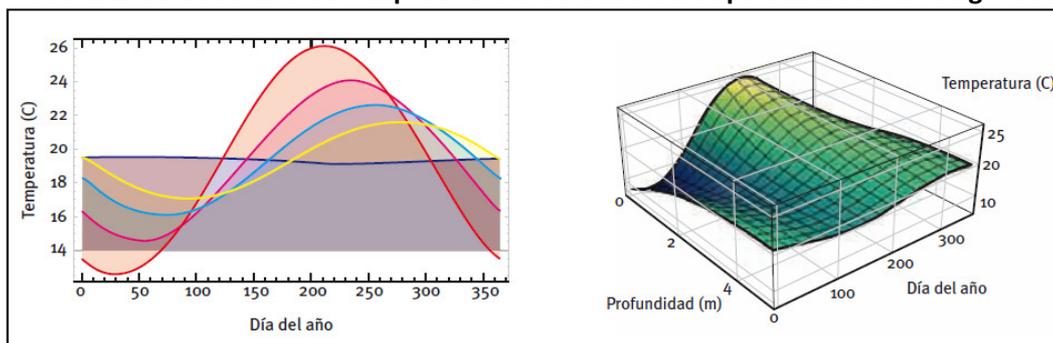
En el capítulo anterior se revisaron los sistemas que conforman un campo geotérmico actuando como intercambiador de calor enterrado (ICE). En el presente capítulo, se presentará y describirá el modelo mediante el cual se determina el largo del intercambiador de calor de modo de satisfacer la demanda térmica de un determinado edificio. Se revisarán los fundamentos térmicos del terreno, aspectos esenciales de las bombas de calor y finalmente el modelo de cálculo utilizado para obtener el largo del intercambiador de calor.

#### 3.1 Fundamentos Térmicos del Terreno

##### 3.1.1 Evolución de la temperatura con la profundidad

La temperatura de la tierra está íntimamente relacionada con la energía, aportada por la radiación solar, las precipitaciones y otros efectos atmosféricos, la cual es transferida diariamente a y desde la superficie de la tierra produciéndose un equilibrio térmico. Como consecuencia, la temperatura de la tierra a ciertas profundidades (aproximadamente 10 metros) se mantiene constante y se aproxima a la temperatura media anual del aire ambiente de la zona. Entre la superficie del terreno y los 10 metros, la temperatura de la tierra variará dependiendo de la profundidad y de las propiedades térmicas del tipo de suelo. La **Ilustración 15** muestra la evolución de la temperatura del terreno según la estación del año para una zona específica. Es posible observar en la imagen de la izquierda que a medida que aumenta la profundidad (rojo, magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro a 0 m, 1 m, 2 m, 3 m y 10 m respectivamente) la amplitud de las oscilaciones térmicas decrece, llegando a ser casi constante a una profundidad de 10 metros. La imagen de la derecha representa el mismo proceso de forma tridimensional.

**Ilustración 15: Variación de la temperatura de la tierra con la profundidad a lo largo del año**



**Fuente:** Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]

Por otra parte y desde el punto de vista del diseño y dimensionado de intercambiadores de calor enterrados se puede señalar que el gradiente geotérmico, definido como la variación de la temperatura con la profundidad y expresado en  $[^{\circ}\text{C}/\text{km}]$ , no se debe tener en cuenta si la profundidad de la perforación no excede los 100 metros ya que su influencia por debajo de estas profundidades es despreciable. [2]

La temperatura del suelo en función de la profundidad y del tiempo, suponiendo un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes, puede calcularse a partir de la siguiente expresión [2]:

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[ \frac{2\pi}{365} \left( t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (1)$$

En donde  $T(z,t)$  es la temperatura en °C del suelo en el tiempo  $t$  a una profundidad  $z$ ,  $T_m$  es la temperatura media anual del suelo en °C (a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura),  $A_s$  es la oscilación de la temperatura superficial en °C,  $t$  es el tiempo en días,  $t_0$  el desfase en días y  $\alpha$  es la difusividad térmica del suelo en  $m^2/\text{día}$ .

Respecto de los parámetros anteriores se puede señalar que la temperatura media del terreno  $T_m$  se puede asumir constante hasta profundidades de 100 metros ya que los efectos del gradiente geotérmico son despreciables. La amplitud de oscilación térmica  $A_s$  dependerá de la zona, el tipo de suelo y el contenido de agua en este. Por último, el desfase en días  $t_0$  corresponde al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad como se observa en la **Ilustración 15**.

Para los objetivos del presente estudio, esto es, dimensionamiento de intercambiador de calor vertical, la temperatura del terreno se considera constante e igual a  $T_m$  ya que las profundidades de las perforaciones verticales superan los 10 m y por lo tanto la oscilación térmica del terreno se hace nula.

### 3.1.2 Propiedades térmicas del terreno

Las propiedades térmicas del terreno relevantes en el diseño de intercambiadores de calor enterrados son la conductividad, la capacidad y la difusividad térmica del terreno.

#### **Conductividad Térmica**

En primer lugar, la conductividad térmica indica la capacidad que posee el terreno para conducir calor y se expresa en  $[W/m \text{ } ^\circ C]$ . Esta propiedad señala la cantidad de calor que atraviesa, en una dirección determinada de un metro de espesor, como consecuencia de una diferencia de un grado entre los extremos opuestos del material. Según la ley de Fourier se expresa como:

$$Q_x = -k * A * \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

En donde  $k$  es la conductividad térmica del terreno,  $Q_x$  es el calor difundido por unidad de tiempo,  $A$  el área de la superficie a través de la cual tiene lugar la transmisión de calor y  $dT/dx$  representa el gradiente de temperatura.

La realización de un test de respuesta térmica del suelo (Thermal Response Test, TRT) es la forma más fiable para la obtención del valor de conductividad térmica del terreno. Los estándares de la IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association) señalan el método desarrollado y recomendado por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) que se puede encontrar en 2007 ASHRAE Handbook on HVAC Applications, Capítulo 32.

### **Capacidad Térmica**

La capacidad térmica por su parte, que se expresa en las unidades  $[J/m^3°C]$  y representa el cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura provocada en este. Se determina por la expresión:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (3)$$

Donde  $C$  es la capacidad térmica y  $dQ$  el calor que es necesario suministrar para incrementar la temperatura en  $dT$ . Esta propiedad puede ser entendida por una parte, como el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno al incrementarse su temperatura. También puede ser vista como la oposición a dicho cambio de temperatura, en la medida en que cuanto mayor sea la capacidad térmica del terreno mayor habrá de ser el calor suministrado para lograr la misma variación de temperatura, lo que puede entenderse como una inercia térmica.

El valor de la capacidad térmica del suelo se obtendrá, al igual que para la conductividad, con un test de respuesta térmica del terreno. Los estándares fijados por el IGSHPA resultan ser la mejor referencia para obtener la metodología válida para el diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.

### **Difusividad Térmica**

A partir de las propiedades anteriores podemos obtener la difusividad térmica del terreno, la cual se define como el ratio entre la conductividad y la capacidad térmica del terreno, y que se expresa en  $m^2/día$ .

La **Tabla 1** recoge los valores más usuales para la conductividad y la capacidad térmica de acuerdo al tipo de terreno.

**Tabla 1: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos suelos**

| TIPO DE ROCA                   | Conductividad térmica (W/mK) |              |      | Capacidad térmica volumétrica |
|--------------------------------|------------------------------|--------------|------|-------------------------------|
|                                | Mín.                         | Valor típico | Máx. | (MJ/m <sup>3</sup> K)         |
| <b>ROCAS MAGMÁTICAS</b>        |                              |              |      |                               |
| Basalto                        | 1,3                          | 1,7          | 2,3  | 2,45                          |
| Diorita                        | 2                            | 2,6          | 2,9  | 2,9                           |
| Grabo                          | 1,7                          | 1,9          | 2,5  | 2,6                           |
| Granito                        | 2,1                          | 3,4          | 4,1  | 2,55                          |
| Peridotita                     | 3,8                          | 4            | 5,3  | 2,7                           |
| Riolita                        | 3,1                          | 3,3          | 3,4  | 2,1                           |
| <b>ROCAS METAMÓRFICAS</b>      |                              |              |      |                               |
| Gneis                          | 1,9                          | 2,9          | 4    | 2                             |
| Mármol                         | 1,3                          | 2,1          | 3,1  | 2                             |
| Metacuarcita                   |                              | 5,8          |      | 2,1                           |
| Micasquistos                   | 1,5                          | 2            | 3,1  | 2,2                           |
| Esquistos arcillosos           | 1,5                          | 2,1          | 2,1  | 2,35                          |
| <b>ROCAS SEDIMENTARIAS</b>     |                              |              |      |                               |
| Caliza                         | 2,5                          | 2,8          | 4    | 2,25                          |
| Marga                          | 1,5                          | 2,1          | 3,5  | 2,25                          |
| Cuarcita                       | 3,6                          | 6            | 6,6  | 2,15                          |
| Sal                            | 5,3                          | 5,4          | 6,4  | 1,2                           |
| Arenisca                       | 1,3                          | 2,3          | 5,1  | 2,2                           |
| Limolitas y argilitas          | 1,1                          | 2,2          | 3,5  | 2,25                          |
| <b>ROCAS NO CONSOLIDADAS</b>   |                              |              |      |                               |
| Grava, seca                    | 0,4                          | 0,4          | 0,5  | 1,5                           |
| Grava, saturada de agua        |                              | 1,8          |      | 2,4                           |
| Arena, seca                    | 0,3                          | 0,4          | 0,8  | 1,45                          |
| Arena, saturada de agua        | 1,7                          | 2,4          | 5    | 2,55                          |
| Arcilla/limo, seco             | 0,4                          | 0,5          | 1    | 1,55                          |
| Arcilla/limo, saturado de agua | 0,9                          | 1,7          | 2,3  | 2,5                           |
| Turba                          | 0,2                          | 0,4          | 0,7  | 2,15                          |
| <b>OTROS MATERIALES</b>        |                              |              |      |                               |
| Bentonita                      | 0,5                          | 0,6          | 0,8  | 3,9                           |
| Hormigón                       | 0,9                          | 1,6          | 2    | 1,8                           |
| Hielo (-10°C)                  |                              | 2,32         |      | 1,87                          |
| Plástico (PE)                  |                              | 0,39         |      |                               |
| Aire (0-20 °C, seco)           |                              | 0,02         |      | 0,0012                        |
| Acero                          |                              | 60           |      | 3,12                          |
| Agua (+ 10°C)                  |                              | 0,58         |      | 4,19                          |

Fuente: Paud, D. Geothermal energy and heat storage. 2002

### 3.2 Rendimiento de la Bomba de Calor

Varios de los parámetros de diseño de un intercambiador de calor enterrado se fijan a través de las especificaciones de la bomba de calor. A través de ellas se determinarán el calor intercambiado con el suelo, el caudal circulante por el intercambiador y el rendimiento del sistema (COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura.

El COP de una bomba de calor representa la relación entre la capacidad térmica de la misma ( $Q$ ) y la potencia eléctrica consumida para suministrarla ( $W$ ). Este rendimiento por tanto, dependerá directamente de la temperatura del fluido que entra en la bomba de calor. Su definición para los modos de calefacción y refrigeración es la siguiente, así como la relación entre el calor absorbido o inyectado al terreno.

$$COP_{calefaccion} = \frac{Q_{calefaccion}}{W_{calefaccion}}$$

$$Q_{absorbido} = Q_{calefaccion} - W_{calefaccion} \quad (4)$$

$$COP_{refrigeracion} = \frac{Q_{refrigeracion}}{W_{refrigeracion}}$$

$$Q_{inyectado} = Q_{refrigeracion} - W_{refrigeracion}$$

La selección de la bomba de calor se realiza a partir del cálculo de cargas térmicas del edificio, la cuales se obtienen de acuerdo a las exigencias de diseño y dimensionado específicas de cada país.

Será necesario por tanto, para realizar el cálculo del largo del intercambiador de calor, establecer a priori la temperatura del fluido de entrada en la bomba de calor y con esto obtener el rendimiento de la bomba tanto en calefacción como en refrigeración.

### 3.3 Cálculo de la longitud del intercambiador de calor

Existen diversos modelos que permiten determinar el largo de un intercambiador de calor enterrado. Una de estas formas de calcular y obtener dicho largo, y que será la utilizada en el presente trabajo, corresponde a la ecuación propuesta por Kavanaugh y Rafferty [3]. La expresión que la determina es la siguiente:

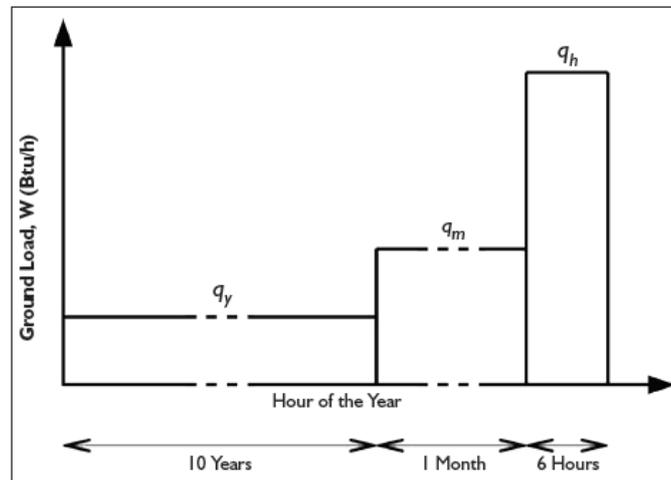
$$L = \frac{q_h * R_b + q_y * R_{10y} + q_m * R_{1m} + q_h * R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (5)$$

En donde  $L$  es el largo total de perforación<sup>1</sup> [m],  $T_m$  es la temperatura media del fluido en la perforación [°C],  $T_g$  es la temperatura imperturbable del terreno [°C],  $T_p$  es una penalización en temperatura [°C] a  $T_g$ ,  $q_y$  la carga térmica media anual al terreno [kW] (desbalance térmico anual),  $q_m$  la carga máxima al terreno por mes [kW],  $q_h$  la carga máxima al terreno por hora [kW],  $R_{10y}$  la resistencia térmica efectiva del terreno en 10 años [m °K/W],  $R_{1m}$  la resistencia térmica efectiva del terreno en 1 mes [m °K/W],  $R_{6h}$  la resistencia térmica efectiva del terreno en 6 horas [m °K/W] y  $R_b$  la resistencia térmica efectiva de la perforación [m °K/W].

<sup>1</sup> Notar que es largo de perforación y no de tubería, ya que la resistencia  $R_b$  se basa en tubería U.

Este modelo supone que la transferencia de calor ocurre únicamente por conducción y que tanto la evaporación de la humedad como el agua subterránea no afectan el proceso de transferencia. El modelo se basa en el peor escenario, el cual está representado por tres pulsos térmicos sucesivos con una duración de 10 años, 1 mes y 6 horas y que se pueden ver representados gráficamente en la **Ilustración 16**. La magnitud de estos pulsos queda determinada por las cargas térmicas requeridas por el edificio y por la eficiencia (COP) de la bomba de calor. Las resistencias térmicas efectivas del terreno ( $R_{10y}$ ,  $R_{1m}$ ,  $R_{6h}$ ) y la penalización en la temperatura imperturbable del terreno ( $T_p$ ) son obtenidas mediante funciones correlativas ya que los cálculos para obtener dichos parámetros no son directos ni sencillos. Este último término, que corrige la temperatura imperturbable del terreno, tiene su fundamento en la interferencia producida entre las distintas perforaciones que conforman el campo geotérmico.

**Ilustración 16: Pulsos Térmicos Sucesivos al Terreno**



**Fuente:** Vertical Geothermal Borefields. [5]

### 3.3.1 Correlación para las resistencias térmicas efectivas del terreno $R_{6h}$ , $R_{1m}$ y $R_{10y}$

La resistencia térmica efectiva del terreno determina la transferencia de calor desde la pared de la perforación hasta el entorno lejano en donde la temperatura de la tierra se mantiene constante e imperturbada. El modelo utilizado para el cálculo de las resistencias térmicas corresponde al propuesto por Kavanaugh y Rafferty [3] y estas quedan determinadas por las siguientes expresiones:

$$R_{6h} = \frac{1}{k} * G \left( \frac{\alpha * t_{6h}}{r_{perf}^2} \right)$$

$$R_{1m} = \frac{1}{k} \left[ G * \left( \frac{\alpha * t_{1m+6h}}{r_{perf}^2} \right) - G * \left( \frac{\alpha * t_{6h}}{r_{perf}^2} \right) \right] \quad (6)$$

$$R_{10y} = \frac{1}{k} \left[ G * \left( \frac{\alpha * t_{10y+1m+6h}}{r_{perf}^2} \right) - G * \left( \frac{\alpha * t_{1m+6h}}{r_{perf}^2} \right) \right]$$

En donde la función  $G$  es la solución unidimensional cilíndrica a una fuente de calor,  $k$  y  $\alpha$  es la conductividad [W/m °K] y la difusividad térmica [m<sup>2</sup>/día] del terreno respectivamente y  $r_{bore}$  el radio de perforación [m].

Eskilson [4] ha demostrado que posterior a un periodo de tiempo igual a  $t_s = H^2/(9\alpha)$ , en donde  $H$  es la profundidad de la perforación [m], los efectos axiales en la transferencia de calor comienzan a ser significativos. En todo caso, el error introducido al omitir el efecto axial en la solución al problema de transferencia de calor, el cual solo aparece para la resistencia térmica de largo plazo ( $R_{10y}$ ), se mantiene por debajo del 5% para valores típicos de difusividad térmica.

Dada la complejidad existente en el cálculo de la función  $G$ , Philippe, et al. [5] propone una función correlativa  $f$  para la obtención de las resistencias térmicas efectivas del terreno. Esta función  $f$  se basa en los cálculos de la función  $G$ , en rangos típicos de operación de  $r_{bore}$  y  $\alpha$ , para obtener cada una de las tres resistencias térmicas efectivas del terreno, esto es,  $R_{6h}$ ,  $R_{1m}$  y  $R_{10y}$ . Los rangos típicos de operación de  $r_{bore}$  y  $\alpha$ , junto a la función  $f$  quedan determinadas por las siguientes expresiones:

$$0,05 \text{ m} \leq r_{bore} \leq 0,1 \text{ m}$$

$$0,025 \text{ m}^2/\text{día} \leq \alpha \leq 0,2 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$R = \frac{1}{k} f(\alpha, r_{perf}) \quad (7)$$

$$f = a_0 + a_1 r_{perf} + a_2 r_{perf}^2 + a_3 \alpha + a_4 \alpha^2 + a_5 \ln(\alpha) + a_6 \ln(\alpha)^2$$

$$+ a_7 r_{perf} \alpha + a_8 r_{perf} \ln(\alpha) + a_9 \alpha \ln(\alpha)$$

Como se observa la función  $f$  depende únicamente de la difusividad térmica del terreno y del radio de perforación. De este modo, se obtienen los coeficientes de correlación para  $f_{6h}$ ,  $f_{1m}$  y  $f_{10y}$  (Ver **Tabla 2**) y con ellos, las tres resistencias térmicas efectivas utilizadas en el cálculo del largo total del intercambiador de calor enterrado. Los resultados de las resistencias térmicas obtenidas directamente con la función  $G$  y los obtenidos a través de la función  $f$  concuerdan en gran medida, presentándose valores de  $R^2$  del 99,8% [5].

**Tabla 2: Coeficientes de correlación para f6h, f1m y f10y.**

|       | $f_{6h}$    | $f_{1m}$    | $f_{10y}$   |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| $a_0$ | 0,66193520  | 0,41327280  | 0,30576460  |
| $a_1$ | -4,81569300 | 0,29129810  | 0,08987446  |
| $a_2$ | 15,03571000 | 0,07589286  | -0,09151786 |
| $a_3$ | -0,09879421 | 0,15639780  | -0,03872451 |
| $a_4$ | 0,02917889  | -0,22893550 | 0,16908530  |
| $a_5$ | 0,11384980  | -0,00492755 | -0,02881681 |
| $a_6$ | 0,00561093  | -0,00269498 | -0,00288658 |
| $a_7$ | 0,77963290  | -0,63803600 | -0,17231690 |
| $a_8$ | -0,32438800 | 0,29508150  | 0,03112034  |
| $a_9$ | -0,01824101 | 0,14933200  | -0,11884380 |

**Fuente:** Vertical Geothermal Borefields. [5]

### 3.3.2 Correlación para la Temperatura de Penalización $T_p$

Como se señaló anteriormente, la temperatura de penalización  $T_p$  [°C], representa una corrección aplicada a la temperatura imperturbable del terreno para tener en cuenta las interferencias térmicas entre las distintas perforaciones del campo geotérmico. Cabe señalar que  $T_p$  será igual a cero cuando se considere un sistema con una única perforación dado que no hay interferencia. Por el contrario, cuando se considere un sistema con múltiples perforaciones  $T_p$  tomará valores distintos de cero (menor que cero en calefacción y mayor que cero en refrigeración).

El método de cálculo de  $T_p$ , propuesto por Bernier, et al. [6], se basa en una función correlativa  $F$  la cual depende de cuatro parámetros como se observa a continuación:

$$T_p = \frac{q_y}{2\pi kL} F(t/t_s, B/H, NB, A) \quad (8)$$

En donde  $H$  es la profundidad de la perforación [m],  $B$  es la distancia entre perforaciones adyacentes [m],  $NB$  es el número total de perforaciones,  $A$  es el ratio que define el aspecto geométrico del campo geotérmico (número de perforaciones en la dirección más larga dividido por el número de perforaciones en la otra dirección) y  $t_s$  [días] es el tiempo característico definido por Eskilson [4].

La función correlativa  $F$  está representada por la siguiente expresión y sus coeficientes están dados en el **Anexo 1**.

$$F = \sum_{i=0}^{36} b_i \times c_i \quad (9)$$

Cabe señalar que esta correlación es válida para valores constantes de  $B$ , es decir, la distancia entre las perforaciones adyacentes debe ser la misma en todo el campo geotérmico. Además, existen otras restricciones que quedan establecidas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} -2 &\leq \ln(t/t_s) \leq 3 \\ 4 &\leq NB \leq 144 \\ 1 &\leq A \leq 9 \\ 0,05 &\leq B/H \leq 0,1 \end{aligned} \quad (10)$$

Según Bernier, et al. [6], la diferencia entre los valores de  $T_p$  utilizando la función correlativa  $F$  y los valores obtenidos a través de la función  $G$  de Eskilson [4] se mantiene por debajo del 10% para la mayoría de los rangos de operación.

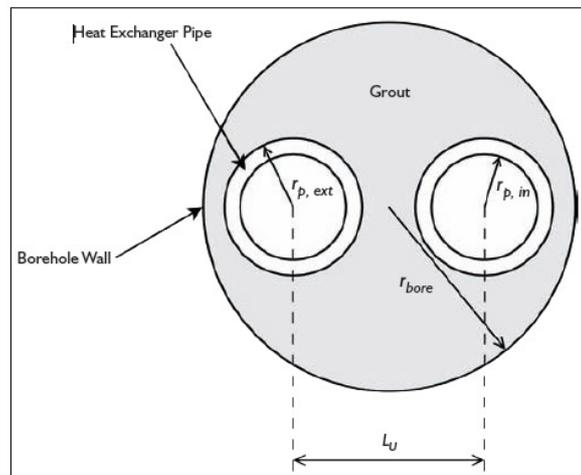
Como podemos observar, la función correlativa  $F$  depende de la longitud de cada perforación ( $H$ ) la cual es desconocida a priori. Lo anterior conlleva a que se requiera de un proceso iterativo para poder calcular la temperatura de penalización. Dado esto, inicialmente se calculará el largo total de perforación asumiendo que  $T_p$  es nulo, esto es, como si fuese una perforación única. Posteriormente y basados en los parámetros  $B$ ,  $NB$  y  $A$  ingresados por el usuario, el sistema realizará un conjunto de cinco iteraciones a través de las cuales reevaluará  $T_p$  a partir de las nuevas longitudes calculadas. El sistema obtendrá finalmente el largo total de perforación y con ello la longitud de cada perforación tomando en cuenta la temperatura de penalización [5].

Cabe señalar por último, que dadas las restricciones presentadas en (10), el modelo planteado no cubre aquellos diseños que contengan 2 o 3 perforaciones. Sin embargo este tipo de campos geotérmicos suelen tener pequeños valores de  $T_p$  dada la escasa interacción entre perforaciones. Como se verá más adelante, en la validación de la implementación del modelo se analizará un caso residencial que cuenta con dos perforaciones. En este caso se utilizará el modelo simulando una única perforación que luego para efectos prácticos de comparación se dividirá en dos.

### 3.3.3 Cálculo de $R_b$

La **Ilustración 17** muestra un corte transversal del tubo en U de una perforación geotérmica típica. Comúnmente las perforaciones son rellenadas con mortero/bentonita de alta conductividad térmica con el fin de mejorar la transferencia de calor y para evitar contaminaciones entre distintos acuíferos. Los estándares del proceso de rellenado y los materiales a utilizar pueden ser revisados en los Estándares de Diseño e Instalación de la IGSHPA [7].

**Ilustración 17: Sección transversal de perforación**



**Fuente:** Vertical Geothermal Borefields. [5]

La temperatura media entre las dos piernas del tubo en U corresponde a  $T_m$  [°C] y se asume constante a lo largo de la perforación. Por lo tanto,  $T_m$  es igual al promedio entre las temperaturas de entrada y salida de la bomba de calor ( $T_m = (T_{in,HP} + T_{out,HP})/2$ ). Como señalamos anteriormente, el diseñador del sistema debe seleccionar y especificar la temperatura, tanto en calefacción como en refrigeración, a la cual ingresará el fluido calo portador a la bomba de calor. Estos parámetros definirán por tanto la eficiencia de la bomba de calor en modo calefacción y refrigeración. Finalmente, la temperatura a la salida de la bomba de calor  $T_{out,HP}$  [°C] quedará definida por la siguiente expresión:

$$T_{out,HP} = T_{in,HP} + \frac{q_h}{m_f * \frac{ABS(q_h)}{1000} * C_p} \quad (11)$$

En donde  $T_{in,HP}$  [°C] es la temperatura de entrada del fluido a la bomba de calor,  $q_h$  [W] es la carga máxima al terreno por hora,  $m_f$  [kg/seg kW] es el ratio entre el flujo másico total del sistema y la carga máxima al terreno por hora y  $C_p$  [J/kg °K] es el calor específico del fluido calor portador.

La resistencia térmica efectiva de la perforación  $R_b$  [m °K/W] es la resistencia entre la pared de la perforación y el fluido en el interior de los tubos (Ver **Ilustración 17**).  $R_b$  se basa en tres resistencias térmicas y se define por la siguiente expresión:

$$R_b = R_g + \frac{R_p + R_{conv}}{2} \quad (12)$$

En donde  $R_{conv}$  [m °K/W] es la resistencia convectiva al interior del tubo,  $R_p$  [m °K/W] es la resistencia conductiva del tubo y  $R_g$  [m °K/W] es la resistencia conductiva del mortero.

Según Hellström [8], las tres resistencias térmicas quedan establecidas por las siguientes expresiones:

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_{p,in} h_{conv}}$$

$$R_p = \frac{\ln(r_{p,ext}/r_{p,in})}{2\pi k_{pipe}} \quad (13)$$

$$R_g = \frac{1}{4\pi k_{grout}} \left[ \ln\left(\frac{r_{bore}}{r_{p,ext}}\right) + \ln\left(\frac{r_{bore}}{L_U}\right) + \frac{k_{grout} - k}{k_{grout} + k} \ln\left(\frac{r_{bore}^4}{r_{bore}^4 - \left(\frac{L_U}{2}\right)^4}\right) \right]$$

En donde  $h_{conv}$  [W/ m<sup>2</sup> °K] es el coeficiente de convección interna,  $r_{p,in}$  [m] y  $r_{p,out}$  [m] son el radio interno y externo de la tubería respectivamente,  $k_{pipe}$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ],  $k_{grout}$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ] y  $k$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ] es la conductividad térmica de la tubería, del mortero y del terreno respectivamente y  $L_U$  [m] es la distancia entre los centros de las dos tuberías.

A su vez, el coeficiente de convección interna  $h_{conv}$  se obtiene a través de los datos ingresados en el sistema y está determinado por las siguientes expresiones:

$$h_{conv} = \frac{Nu_0 * k_{fluido}}{D}$$

$$\text{con } Nu_0 = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} * \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$f = (0,790 * \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (14)$$

$$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu} \quad \text{y} \quad Pr = \frac{\mu * C_p}{k_{fluido}}$$

En donde  $Nu_0$ ,  $Re$  y  $Pr$  es el número de Número de Nusselt, Reynolds y Prandtl respectivamente,  $D$  [m] es el diámetro de la tubería y  $k_{fluido}$  [W/m °K],  $V$  [m/s],  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu$  [N s/m<sup>2</sup>] y  $C_p$  [kJ/kg °K] es la conductividad térmica, la velocidad media, la densidad, la viscosidad cinemática y la capacidad térmica del fluido respectivamente.

El conjunto de ecuaciones presentadas anteriormente, junto a los coeficientes de las ecuaciones correlativas  $f$  y  $F$ , son las utilizadas en la implementación del modelo de cálculo del largo del intercambiador de calor enterrado.

## 4. Implementación del modelo

La herramienta Excel desarrollada se basa en 8 pantallas a través de las cuales se ingresan los datos que permiten realizar el cálculo del largo del intercambiador vertical enterrado. Como regla general se puede mencionar que las pantallas cuentan con celdas de color blanco, las cuales deberán ser rellenas con información y celdas de color gris las cuales entregan información calculada por el programa y no pueden ser modificadas. La última pantalla muestra los resultados obtenidos.

### 4.1 Configuración de Perforaciones

En la primera pantalla, "Perforaciones", se ingresa la información relacionada con la configuración del campo de perforaciones. Como se ha mencionado, el modelo permite únicamente el cálculo de intercambiadores de calor verticales enterrados, de ahí que el campo *tipo de perforación* sea igual a vertical y no modificable. Se deberán ingresar los datos respecto del *número de perforaciones*, *radio de perforación [m]*, *distancia entre perforaciones [m]*, *geometría del campo de perforaciones* y *conductividad térmica del mortero [W/m<sup>2</sup>k]*. El programa calculará y presentará el valor en el campo *ratio de diseño*.

Como se ha señalado en el capítulo anterior, el modelo utilizado para calcular el largo total del intercambiador de calor supone que las perforaciones son realizadas de manera matricial, esto es, que la distancia entre perforaciones adyacentes es constante. Además, si se considera un sistema con múltiples perforaciones, se permite introducir únicamente valores que cumplan las restricciones señaladas en (8), esto es, *número de perforaciones* entre 4 y 144, y *geometría de perforación* tal que el *ratio de diseño* sea mayor igual a 1 y menor igual a 9. La apariencia de esta primera pantalla puede ser apreciada en la siguiente figura.

Ilustración 18: Pantalla Configuración de Perforaciones

| CONFIGURACIÓN DE PERFORACIONES |                      |                    |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| Tipo de perforación            | Vertical             |                    |
| Número de perforaciones        | 120                  | ▼                  |
| Radio de perforación           | 0,054                | m                  |
| Distancia entre perforaciones  | 6,096                | m                  |
| Geometría de perforación       | 120; Matricial 12X10 | ▼                  |
| Conductividad Térmica Mortero  | 1,73                 | W/m <sup>2</sup> K |
| Ratio de diseño                | 1,20                 |                    |

**SIGUIENTE**

Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2 Selección de Tuberías y Fluido

En la segunda pantalla, “Tubería y Fluido”, se ingresan los datos relacionados con el tipo de tubería que será utilizada en las perforaciones y el fluido calo portador.

Respecto de las tuberías, el polietileno (PE) y polibutileno (PB) son los materiales más comunes en los intercambiadores de calor enterrados. Ambos materiales presentan buenas características de flexibilidad y resistencia, y su unión puede realizarse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. Los estándares referidos a los tipos de tuberías a utilizar, el proceso de fabricación de estas y sus métodos de unión pueden ser revisados en los Estándares de Diseño e Instalación de la IGSHPA [7].

En la selección del diámetro de la tubería se deben tener presente dos aspectos principales: la caída de presión y el funcionamiento térmico. Por una parte, el diámetro de la tubería debe ser lo suficientemente grande para generar pequeñas pérdidas de carga y por lo tanto, una menor potencia de bombeo. Por otra parte, el diámetro debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades del fluido y de esta forma garantizar la turbulencia de este al interior del tubo, lo cual favorecerá el traspaso térmico entre el fluido y la pared interior de la tubería. Cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico. La condición que asegura la turbulencia está dada por el número de Reynold ( $Re$ ) el cual debe cumplir la siguiente condición:

$$Re = \frac{4*Q}{\pi*\mu*D} > 2300 \quad (15)$$

En donde  $Q$  [ $m^3/s$ ] es el caudal,  $D$  [m] el diámetro de la tubería y  $\mu$  [ $m^2/s$ ] la viscosidad cinemática del fluido.

Los datos previamente definidos<sup>2</sup> a seleccionar/ingresar por el usuario serán el *material*, el *tipo*, la *presión nominal [bar]*, el *diámetro nominal [pulgadas]* de la tubería y la *distancia centro-centro [m]* de las tuberías en U. Se ha decidido que este último parámetro no esté previamente definido dado el amplio rango de posibles valores y la importancia de este valor como se verá más adelante. Una vez seleccionados estos valores la pantalla mostrará los valores de diámetro *interno y externo de tubería* y la *conductividad térmica* de esta.

Los fluidos calo portadores utilizados comúnmente en los intercambiadores de calor enterrados son el agua pura o, agua con anticongelante si se prevé en el diseño del sistema que este puede tener riesgo de congelación debido a temperaturas frías del terreno o a un elevado funcionamiento en modo calefacción. Las características de transferencia de calor, punto de congelación, requerimientos de presión, corrosividad, toxicidad y coste son los principales factores a la hora de seleccionar el fluido que se utilizará en el intercambiador de calor enterrado.

---

<sup>2</sup> **Anexo 2:** Tabla Principales características de las tuberías.

La tabla a continuación recoge las propiedades físicas de los fluidos más empleados en estos sistemas y que representan la base<sup>3</sup> de las opciones disponibles a seleccionar en la herramienta Excel desarrollada.

**Tabla 3: Propiedades Físicas de los Fluidos**

| Tipo           | T° Media °C | Punto Congelamiento °C | Densidad kg/m <sup>3</sup> | Capacidad Térmica J/kg°K | Conductividad W/m°K | Viscosidad Pa s |
|----------------|-------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| Agua           | 20          | 0                      | 998,1                      | 4173                     | 0,5929              | 0,001002        |
| Etilenglicol   | 20          | -13                    | 925,9                      | 2185                     | 0,26                | 0,0209          |
| Propilenglicol | 20          | -12                    | 863                        | 2503,71                  | 0,2                 | 0,0605          |

**Fuente:** *Guía Técnica. Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. IDAE. [2]*

El usuario deberá seleccionar el *fluido* a utilizar e ingresar los datos de *porcentaje en peso de anticongelante, temperatura media del fluido y flujo total del sistema*. Una vez ingresados estos valores, la pantalla indicará las propiedades físicas del fluido relevantes para el desarrollo de los cálculos revisados en el capítulo anterior. La figura a continuación muestra la apariencia de la pantalla *Selección Tubería y Fluido*.

**Ilustración 19: Pantalla Selección de Tubería y Fluido**

| SELECCIÓN TUBERÍA              |             | SELECCIÓN FLUIDO           |                           |
|--------------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|
| Material                       | Poliétileno | Fluido                     | Agua/Propilenglicol       |
| Tipo                           | PE50A       | % en peso Anticongelante   | 20 %                      |
| Presión Nominal                | PN6         | Temperatura media fluido   | 3 °C                      |
| Diámetro Nominal               | 1"          | Flujo total del sistema    | 104.400,0 l/h             |
| Distancia centro-centro U-tube | 0,044 m     | Flujo por perforación      | 870 l/h                   |
| Diámetro Interno               | 0,021 m     | Densidad                   | 1.020,6 kg/m <sup>3</sup> |
| Diámetro Externo               | 0,025 m     | Capacidad Térmica          | 3.975,8 J/kg°K            |
| Conductividad Térmica          | 0,430 W/m°K | Conductividad Térmica      | 0,492 W/m°K               |
|                                |             | Viscosidad                 | 0,00389 Pa s              |
|                                |             | Coefficiente de convección | 1.189 W/m <sup>2</sup> °K |
|                                |             | N° de Reynolds             | 3.842                     |

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 4.3 Selección de las propiedades térmicas del terreno

Las propiedades térmicas relevantes para el diseño del intercambiador de calor son la conductividad, la capacidad y la difusividad térmica del terreno. Como se vio en el capítulo anterior, con ellas es posible determinar la resistencia térmica efectiva del terreno y por tanto el comportamiento de la transferencia del calor en este.

El usuario tendrá que seleccionar el *tipo de suelo* y deberá ingresar la *temperatura imperturbable del terreno*. Realizado lo anterior, el sistema mostrará en pantalla los valores de

<sup>3</sup> El usuario podrá seleccionar agua pura, agua con propilenglicol o agua con etilenglicol como fluido portador del sistema. Para la metodología de cálculo de las propiedades del fluido referirse a Thermophysical Properties of Brines, Models. M. Conde Engineering, 2011 [15]

conductividad, capacidad y difusividad térmica del terreno. La figura a continuación muestra la apariencia de la pantalla “Selección del Terreno”.

**Ilustración 20: Pantalla Selección del Terreno**

| SELECCIÓN DEL TERRENO     |   |                     |                     |
|---------------------------|---|---------------------|---------------------|
| Tipo Suelo                | DEFINIDO POR EL USUARIO - Maxey Elementary School |                     | INGRESAR TIPO SUELO |
| Temperatura imperturbable | 12,41   | °C                  | ATRÁS               |
| Conductividad Térmica     | 2,250   | W/m <sup>2</sup> K  |                     |
| Capacidad Térmica         | 2,877   | MJ/m <sup>3</sup> K | SIGUIENTE           |
| Difusividad Térmica       | 0,068   | m <sup>2</sup> /día |                     |

**Fuente:** Elaboración Propia.

Por último y en el caso que se quiera ingresar un nuevo tipo de terreno, el usuario podrá realizarlo a través de la opción “Ingresar Tipo Suelo”. El sistema solicitará el *tipo de suelo/nombre, conductividad y capacidad térmica* del terreno. Luego en la pantalla principal “Selección del Terreno” deberá seleccionar el tipo de suelo ingresado el cual se encontrará en la sección “definido por el usuario”. La **ilustración 21** muestra la apariencia de la pantalla “Ingreso Tipo Suelo”.

**Ilustración 21: Pantalla Ingreso Tipo Suelo**

| INGRESO TIPO SUELO    |                      |                     |          |
|-----------------------|----------------------|---------------------|----------|
| Tipo Suelo            | <input type="text"/> |                     | CANCELAR |
| Conductividad Térmica | <input type="text"/> | W/m <sup>2</sup> K  | ACEPTAR  |
| Capacidad Térmica     | <input type="text"/> | MJ/m <sup>3</sup> K |          |

**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 4.4 Ingreso de las Cargas Térmicas del Edificio

El ingreso de las cargas térmicas del edificio puede realizarse mediante el ingreso directo de la información o a través del sistema de grados día de calefacción y refrigeración. El sistema mostrará una pantalla en la cual el usuario deberá seleccionar el método a utilizar como se muestra a continuación.

**Ilustración 22: Pantalla Selección Método Ingreso de Cargas Térmicas**

| SELECCIÓN MÉTODO INGRESO DE CARGAS TÉRMICAS     |   |
|---|---|
| <input checked="" type="radio"/> MÉTODO DIRECTO | <input type="radio"/> MÉTODO GRADOS DÍA |

**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 4.4.1 Método Directo

Como se señaló, el primer método consiste en el ingreso directo de las cargas térmicas del edificio en caso de que se cuente con esta información. El usuario deberá ingresar mensualmente y para todo el año, tanto para calefacción como para refrigeración, la *energía demandada* por el edificio [kWh], la *potencia máxima demandada* [kW] y el *calor absorbido e inyectado* por la bomba de calor al terreno [kWh]. Con esta información y los datos de la bomba de calor, como se verá en la pantalla “Configuración de la Bomba de Calor”, el sistema podrá calcular la carga máxima al terreno por hora ( $q_h$ ) y por mes ( $q_m$ ), y la carga promedio al terreno por año ( $q_y$ , desbalance térmico anual).

Cabe señalar que la potencia máxima demanda por mes que debe ingresar el usuario, y que suele denominarse potencia máxima o carga pico de demanda, no coincide con la potencia instalada ya que esta última es siempre algo mayor que la primera para que la instalación pueda responder de manera rápida a los picos de demanda.

La manera más fidedigna de obtener estos datos es a través de programas de simulación de sistemas de climatización (eQuest, Energy10, DOE-2, TRNSYS, VISUALDOE, ECOTECT, etc.), los cuales calculan la demanda energética anual del edificio en función de variables climáticas, constructivas y de uso.

La figura a continuación muestra la apariencia de la pantalla “Ingreso Cargas Térmicas – Método Directo”.

**Ilustración 23: Pantalla Ingreso Cargas Térmicas – Método Directo**

| INGRESO CARGAS TÉRMICAS - METODO DIRECTO |             |               |             |               |           |           |
|--|-------------|---------------|-------------|---------------|-----------|-----------|
| Mes                                      | Total       | Total         | Pot. Max.   | Pot. Max.     | Calor     | Calor     |
|  | Calefacción | Refrigeración | Calefacción | Refrigeración | Absorbido | Inyectado |
|  | kWh         | kWh           | kW          | kW            | kWh       | kWh       |
| Enero                                    | 100.648,1   | 1.141,4       | 523,0       | 45,0          | 74.405,0  | 3,1       |
| Febrero                                  | 70.481,7    | 438,1         | 497,0       | 17,0          | 52.175,0  | 11,9      |
| Marzo                                    | 42.614,7    | 3.230,6       | 496,0       | 88,0          | 29.431,4  | 1.312,8   |
| Abril                                    | 20.754,2    | 7.428,3       | 265,0       | 116,0         | 12.120,8  | 5.133,3   |
| Mayo                                     | 7.797,8     | 27.101,9      | 144,0       | 276,0         | 1.790,8   | 27.950,6  |
| Junio                                    | 1.871,4     | 49.993,1      | 67,0        | 442,0         | 28,1      | 58.388,3  |
| Julio                                    | 1.560,0     | 66.575,6      | 62,0        | 420,0         | 0,8       | 78.195,8  |
| Agosto                                   | 1.408,6     | 69.020,6      | 45,0        | 437,0         | 10,0      | 80.970,3  |
| Septiembre                               | 6.036,9     | 25.832,2      | 84,0        | 253,0         | 1.041,9   | 27.137,5  |
| Octubre                                  | 17.218,6    | 12.836,7      | 317,0       | 323,0         | 8.966,1   | 11.095,0  |
| Noviembre                                | 59.655,8    | 2.064,4       | 322,0       | 64,0          | 43.111,9  | 188,9     |
| Diciembre                                | 111.155,0   | 1.161,1       | 373,0       | 30,0          | 82.875,3  | 0,0       |

ATRÁS

SIGUIENTE

**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 4.4.2 Método de los Grados Día

Este segundo método considera el caso en que el usuario no cuenta con los datos de las cargas térmicas del edificio. Este método por tanto, permite estimar dentro de unos márgenes razonables, los consumos energéticos de calefacción y refrigeración de un edificio para un periodo de tiempo determinado. Además permite obtener la potencia máxima demandada por el edificio ya sea en calefacción o en refrigeración. El método, considerado de tipo estático, supone una temperatura constante al interior del edificio sin tener presente su variación o regulación a lo largo del día ni tampoco considera los efectos de inercia térmica. Los niveles de uso e intermitencia se pueden introducir de forma aproximada utilizando los coeficientes correspondientes.

Según [9], el número de grados día de calefacción referidos a una temperatura base de referencia ( $T_B$ ) y que se designa por  $GDC_{TB}$  se define como la suma, para todos los días del periodo considerado, de la diferencia entre la temperatura base ( $T_B$ ) y la temperatura media del día ( $T_{md}$ ), siempre y cuando esta temperatura sea inferior a la temperatura base. El cálculo de los grados día de calefacción se realiza mediante la siguiente expresión:

$$GDC_{TB} = \sum_{d=1}^n (T_B - T_{md}) \quad \text{Sólo si } T_B > T_{md} \quad (16)$$

En donde  $n$  es el número de días del periodo de tiempo considerado. Para cálculos en calefacción es frecuente considerar como temperaturas base  $15^\circ\text{C}$  y  $18^\circ\text{C}$ .

De manera similar se definen los grados día de refrigeración  $GDR_{TB}$ . Ahora bien, las temperaturas base de referencia son mayores ( $23^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  o  $27^\circ\text{C}$ ) y el cálculo se realiza como la suma, para todos los días del periodo de tiempo considerado, de la diferencia entre la temperatura media del día y la temperatura base, siempre y cuando la primera sea superior a la temperatura base. Con esto su expresión de cálculo es la siguiente:

$$GDR_{TB} = \sum_{d=1}^n (T_{md} - T_B) \quad \text{Sólo si } T_{md} > T_B \quad (17)$$

Una vez obtenidos los grados día de calefacción y refrigeración, la demanda de calor de calefacción  $Q_C$  [kWh] para un cierto periodo de tiempo queda determinada por:

$$Q_C = u * i * G * V * GDC_{TB} * 0,024 \text{ kWh} \quad (18)$$

En donde  $u$  e  $i$  son los coeficientes de uso e intermitencia de la instalación respectivamente,  $G$  es el coeficiente volumétrico de pérdidas del edificio [ $\text{W}/\text{m}^3\text{C}$ ],  $V$  es el volumen habitable a calefactar [ $\text{m}^3$ ] y  $GDC_{TB}$  los grados día de calefacción en base  $T_B$  para el periodo considerado.

De manera análoga, la demanda energética de frío queda establecida por:

$$Q_R = u * i * G * V * GDR_{TB} * 0,024 kWh \quad (19)$$

Al realizar este cálculo de manera mensual, tanto para la carga en calefacción como para refrigeración, se podrá obtener el consumo anual energético en climatización. Cabe destacar que el coeficiente volumétrico de pérdidas ( $G$ ) corresponde a las pérdidas térmicas totales por unidad de volumen habitable y por cada grado centígrado de diferencia entre la temperatura interior y exterior del recinto. Estas pérdidas se deben a la transmisión a través de los cerramientos, infiltraciones y ventilación. En la práctica, una estimación razonable para valores del coeficiente  $G$ , en función del aislamiento y de las renovaciones e infiltraciones de aire, es la siguiente:

- Edificios de viviendas mal aisladas:  $G \gg 1.25$  a  $2 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$
- Edificios de viviendas aisladas:  $G \gg 0.9$  a  $1.2 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$
- Edificios de viviendas muy bien aisladas:  $G \gg 0.5 \div 0.9 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$

Además, es necesario obtener la potencia máxima demandada por el edificio tanto en calefacción como en refrigeración. La expresión que permitirá obtener este valor es la siguiente:

$$P_t = G * V * (t_i - t_e) \quad (20)$$

En donde  $P_t$  es la potencia máxima demandada por el edificio [W] y,  $t_i$  y  $t_e$ , las temperaturas interior y exterior de proyecto respectivamente [ $^\circ\text{C}$ ]. De manera análoga, se obtiene la potencia máxima para el modo de refrigeración considerando las temperaturas correspondientes a dicho modo.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente método el usuario deberá ingresar el *coeficiente volumétrico de pérdidas del edificio* [ $\text{W}/^\circ\text{Cm}^3$ ], el *volumen habitable a climatizar* [ $\text{m}^3$ ], los *coeficientes de uso e intermitencia* de la instalación, las *temperaturas interior y exterior de proyecto* para calefacción y refrigeración [ $^\circ\text{C}$ ] y los *grados día* para cada mes del año también en calefacción y refrigeración.

La información ingresada y elaborada con el método de los grados día permitirá, al igual que con el ingreso directo de las cargas térmicas, obtener las cargas máximas absorbidas e inyectadas al terreno por hora, mes y año. La **Ilustración 24** muestra la apariencia de la pantalla “Ingreso Cargas Térmicas – Método Grados Día”.

**Ilustración 24: Pantalla Ingreso Cargas Térmicas – Método Grados Día**

**INGRESO CARGAS TÉRMICAS - MÉTODO GRADOS DIAS**

|                                  |  |                   |                      |                   |
|----------------------------------|--|-------------------|----------------------|-------------------|
| Coef. Volumétrico de pérdidas    |  | W/°C m3           |                      |                   |
| Volumen a climatizar             |  | m3                |                      |                   |
| Coef. Uso de la instalación      |  |                   |                      |                   |
| Coef. Intermitencia instalación  |  |                   |                      |                   |
| Temperatura Interior de Proyecto |  | °C                |                      | °C                |
| Temperatura Exterior de Proyecto |  | °C                |                      | °C                |
| <b>MES</b>                       |  | <b>Grados día</b> | <b>Consumo [KWh]</b> | <b>Grados día</b> |
| Enero                            |  |                   | 0,0                  |                   |
| Febrero                          |  |                   | 0,0                  |                   |
| Marzo                            |  |                   | 0,0                  |                   |
| Abril                            |  |                   | 0,0                  |                   |
| Mayo                             |  |                   | 0,0                  |                   |
| Junio                            |  |                   | 0,0                  |                   |
| Julio                            |  |                   | 0,0                  |                   |
| Agosto                           |  |                   | 0,0                  |                   |
| Septiembre                       |  |                   | 0,0                  |                   |
| Octubre                          |  |                   | 0,0                  |                   |
| Noviembre                        |  |                   | 0,0                  |                   |
| Diciembre                        |  |                   | 0,0                  |                   |

ATRÁS  
SIGUIENTE

*Fuente:* Elaboración Propia.

#### 4.5 Configuración de la Bomba de Calor

En esta pantalla el usuario deberá especificar *las temperaturas de entrada del fluido*, el COP y la *potencia nominal de la bomba de calor*, tanto en modo calefacción como en refrigeración.

La selección de la temperatura de entrada del fluido a la bomba de calor es un parámetro clave que debe elegir el diseñador del sistema. Como bien señala IDAE [2], la elección de la temperatura deberá encontrar el compromiso óptimo entre dos consideraciones. Por un parte, cuanto más baja sea la temperatura en invierno (más alta en verano) mayor será la diferencia con la temperatura del suelo y menor tendrá que ser el largo del intercambiador para el mismo intercambio de calor, por lo que los costes de inversión serán menores. Por la otra parte, cuanto más alta sea la temperatura en invierno (más baja en verano) mayor será el COP del sistema, por lo que el ahorro energético será mayor.

El cálculo de las cargas al terreno ( $q_h$ ,  $q_m$  y  $q_y$ ), dependerá del método seleccionado para el ingreso de las cargas térmicas. El cálculo se diferencia básicamente en que con el método directo se cuenta con la energía absorbida e inyectada al terreno, mientras que con el segundo método, estos valores deben ser calculados a través del COP de la bomba de calor. A continuación se describen los cálculos para ambos casos.

#### 4.5.1 Cálculo de cargas al terreno por método directo

Cuando las cargas térmicas demandadas por el edificio han sido ingresadas por el método directo, el sistema calculará y presentará los valores de las cargas máximas al terreno por hora, mes y año, según las siguientes expresiones para calefacción:

$$q_{h,c} = P_{C,max} - P_{C,max}/COP_C$$
$$q_{m,c} = \frac{EMAP_{C,max}}{ND_{P_{C,max}} * 24} \quad (21)$$

$$q_y = abs\left(\frac{ETA - ETI}{8760}\right)$$

En donde,

|                    |   |
|--------------------|---|
| $q_{h,c}$ :        | Carga máxima al terreno por hora en calefacción [kW]                            |
| $q_{m,c}$ :        | Carga máxima al terreno por mes en calefacción [kW]                             |
| $q_y$ :            | Carga promedio anual al terreno [kW] ( <i>desbalance térmico anual</i> )        |
| $P_{C,max}$ :      | Potencia máxima demandada en calefacción [kW]                                   |
| $COP_C$ :          | Rendimiento de la bomba de calor en modo calefacción                            |
| $EMAP_{C,max}$ :   | Energía mensual absorbida al terreno en calefacción en mes de $P_{C,max}$ [kWh] |
| $ND_{P_{C,max}}$ : | Número de días en mes de $P_{C,max}$ [días]                                     |
| $ETA$ :            | Energía total anual absorbida del terreno en calefacción [kWh]                  |
| $ETI$ :            | Energía total anual inyectada al terreno en refrigeración [kWh]                 |

Las cargas máximas al terreno en refrigeración se obtienen de forma análoga mediante las siguientes expresiones:

$$q_{h,R} = P_{R,max} + P_{R,max}/COP_R$$
$$q_{m,R} = \frac{EMIP_{R,max}}{ND_{P_{R,max}} * 24} \quad (22)$$

$$q_y = abs\left(\frac{ETA - ETI}{8760}\right)$$

En donde,

|                    |   |
|--------------------|---|
| $q_{h,R}$ :        | Carga máxima al terreno por hora en refrigeración [kW]                            |
| $q_{m,R}$ :        | Carga máxima al terreno por mes en refrigeración [kW]                             |
| $P_{R,max}$ :      | Potencia máxima demandada en refrigeración [kW]                                   |
| $COP_R$ :          | Rendimiento de la bomba de calor modo refrigeración                               |
| $EMIP_{R,max}$ :   | Energía mensual inyectada al terreno en refrigeración en mes de $P_{R,max}$ [kWh] |
| $ND_{P_{R,max}}$ : | Número de días en mes de $P_{R,max}$ [días]                                       |

#### 4.5.2 Cálculo de cargas al terreno por método de los grados día

En el caso que las cargas térmicas demandadas por el edificio hayan sido obtenidas por el método de los grados día, el sistema calculará y presentará los valores de las cargas máximas al terreno por hora, mes y año según las siguientes expresiones en calefacción:

$$P_{C,max} = \frac{G * V * (t_i - t_e)}{1000}$$

$$q_{h,c} = P_{C,max} - P_{C,max}/COP_C$$

$$q_{m,c} = \frac{EMD_{C,max}}{ND_{EMDc,max} * 24} - \frac{EMD_{C,max}}{ND_{EMDc,max} * 24 * COP_C} \quad (23)$$

$$q_y = \frac{abs \left[ \left( ETD_C - \frac{ETD_C}{COP_C} \right) - \left( ETD_R + \frac{ETD_R}{COP_R} \right) \right]}{8760}$$

En donde,

|                   |   |
|-------------------|---|
| $G$ :             | Coficiente volumétrico de pérdidas del edificio [W/m <sup>3</sup> °C] |
| $V$ :             | Volumen a climatizar [m <sup>3</sup> ]                                |
| $t_i$ y $t_e$ :   | Temperaturas interior y exterior de proyecto respectivamente [°C]     |
| $EMD_{C,max}$ :   | Máxima energía mensual demandada en calefacción [kWh]                 |
| $ND_{EMDc,max}$ : | Número de días en mes $EMD_{C,max}$ [días]                            |
| $ETD_C$ :         | Energía total anual demandada en calefacción [kWh]                    |
| $ETD_R$ :         | Energía total anual demandada en refrigeración [kWh]                  |

Las cargas máximas al terreno en refrigeración se obtienen de forma análoga.

$$P_{R,max} = \frac{G * V * (t_e - t_i)}{1000}$$

$$q_{h,R} = P_{R,max} - P_{R,max}/COP_R$$

$$q_{m,R} = \frac{EMD_{R,max}}{ND_{EMDr,max} * 24} - \frac{EMD_{R,max}}{ND_{EMDr,max} * 24 * COP_R} \quad (24)$$

$$q_y = \frac{abs \left[ \left( ETD_C - \frac{ETD_C}{COP_C} \right) - \left( ETD_R + \frac{ETD_R}{COP_R} \right) \right]}{8760}$$

En donde,

|                   |   |
|-------------------|---|
| $EMD_{R,max}$ :   | Máxima energía mensual demandada en refrigeración [kWh] |
| $ND_{EMDr,max}$ : | Número de días en mes $EMD_{R,max}$ [días]              |

Finalmente, la figura a continuación muestra la apariencia de la pantalla “Configuración Bomba de Calor”. Cabe mencionar que la pantalla señalada es única, a pesar de que los cálculos difieran según el método de ingreso de las cargas térmicas.

**Ilustración 25: Pantalla Configuración Bomba de Calor**

| CONFIGURACION BOMBA DE CALOR      |             |               |    |                   |
|-----------------------------------|-------------|---------------|----|-------------------|
|                                   | CALEFACCION | REFRIGERACION |    |                   |
| Temperatura Entrada Fluido        | 4,44        | 23,39         | °C |                   |
| COP Bomba de Calor                | 4           | 4,62          |    |                   |
| Potencia Nominal Bomba de Calor   | 598         | 772           | kW |                   |
| Potencia Máxima Demandada         | 523,0       | 442,0         | kW |                   |
| Carga máxima al terreno por hora  | 392,3       | 537,7         | kW | <b>ATRAS</b>      |
| Carga máxima al terreno por mes   | 100,0       | 81,1          | kW |                   |
| Carga promedio al terreno por año | 1,78        | 1,78          | kW | <b>RESULTADOS</b> |

*Fuente:* Elaboración Propia.

#### 4.6 Resultados

Esta pantalla muestra los resultados del largo total de perforación y la longitud de cada perforación (múltiples perforaciones) tanto para calefacción como refrigeración. Dado que los sistemas de climatización se construyen para el peor de los casos, el usuario deberá tomar en consideración la mayor de las longitudes. Además, se muestran los resultados referidos a las resistencias térmicas del terreno y perforación, a la bomba de calor y a la interacción entre perforaciones. La figura a continuación muestra la apariencia de la pantalla “Resultados”.

**Ilustración 26: Pantalla Resultados**

| RESULTADOS                |                                   |                    |             |               |                    |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|---------------|--------------------|
|                           |                                   |                    | CALEFACCIÓN | REFRIGERACIÓN |                    |
| GENERAL                   | Longitud Total                    | L                  | 10.726,4    | 9.918,4       | m                  |
|                           | Longitud por Perforación          | H                  | 89,4        | 82,7          | m                  |
| TERRENO                   | Resistencia Térmica Terreno 6h    | $R_{6h}$           | 0,101       | 0,101         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 1m    | $R_{1m}$           | 0,160       | 0,160         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 10y   | $R_{10y}$          | 0,170       | 0,170         | m <sup>2</sup> K/W |
| PERFORACIÓN               | Resistencia Térmica Convectiva    | $R_{conv}$         | 0,013       | 0,013         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Tubería       | $R_p$              | 0,065       | 0,065         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Mortero       | $R_g$              | 0,076       | 0,076         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Perforación   | $R_b$              | 0,115       | 0,115         | m <sup>2</sup> K/W |
| BOMBA DE CALOR            | T° salida fluido bomba de calor   | $T_{outHP}$        | 1,11        | 27,96         | °C                 |
|                           | T° media fluido en perforación    | $T_m$              | 2,77        | 25,67         | °C                 |
| INTERACCION PERFORACIONES | Ratio distancia-profundidad       | B/H                | 0,068       | 0,074         | -                  |
|                           | Logaritmo del tiempo adimensional | $\ln(t_{10y}/t_s)$ | -1,280      | -1,123        | -                  |
|                           | Penalización en temperatura       | $T_p$              | -0,235      | 0,242         | °C                 |

*Fuente:* Elaboración Propia.

## 5. Validación del Modelo

En el presente capítulo se realiza la validación del modelo implementado mediante su aplicación a dos casos prácticos. Entre sus diversas publicaciones, Shonder, et al., [10, 11] ha utilizado estos casos para comparar diferentes programas de diseño de intercambiadores de calor verticales. El objetivo por tanto, es utilizar los datos presentados en sus publicaciones, ingresarlos en el modelo implementado y comparar los resultados con los obtenidos por Shonder, et al. Además, se desarrollará un análisis de sensibilidad sobre algunas variables del modelo para determinar aquellas más relevantes y de mayor influencia en los resultados.

### 5.1 Caso 1. Aplicación Comercial. Maxey Elementary School

#### 5.1.1 Descripción y datos de modelación

El “Maxey Elementary School” es un establecimiento educacional construido en 1995 en Lincoln, Nebraska y está equipado con bombas de calor geotérmicas para proveer refrigeración y calefacción al recinto. El colegio tiene un área aproximada de 6.410 [m<sup>2</sup>], en donde se encuentran las salas de clases, oficinas, salas de reuniones, bodegas, gimnasio y cafetería entre otros. Las salas de clases se encuentran situadas principalmente en el perímetro del edificio mientras que las oficinas y salas de reuniones se sitúan cercanas al centro. El diseño del colegio consiste en una planta baja abierta con paredes de baja altura que permiten una buena visibilidad, grandes ventanales y tragaluces en los corredores principales que permiten el ingreso de luz natural y un patio en el centro del edificio.

El colegio fue diseñado bajo los estándares de ANSI/ASHRAE 62-1989 y cuenta con un total de 54 bombas de calor con una capacidad nominal de refrigeración y calefacción de 772 [kW] y 598 [kW] respectivamente. Las 54 bombas de calor absorben e inyectan calor a través de un intercambiador de calor vertical enterrado, que consta de 120 perforaciones, organizadas matricialmente en 12 X 10, con una separación entre perforaciones de 6 [m]. Cada perforación tiene una profundidad de 73 [m] y un diámetro de 10,8 [cm] (4¼ in.). Se utilizó gravilla fina para rellenar las perforaciones ya que el nivel freático del agua subterránea se encuentra a 12 [m], considerándose que la gravilla proveía un buen contacto térmico para las tuberías. Los “loops” verticales consisten en tuberías de polietileno de alta densidad de 2,54 [cm] de diámetro y unidas mediante fusión térmica. El líquido presente en el sistema corresponde a una mezcla de agua con un 22% en volumen de propilenglicol.

Por otra parte, las cargas térmicas del edificio recogidas igualmente en Shonder, et al. [X], fueron obtenidas mediante la simulación en TRNSYS del sistema de climatización del establecimiento educacional. Con el ingreso de las características constructivas del edificio, los parámetros de los equipos de climatización y la calibración del modelo en TRNSYS con datos reales obtenidos en el establecimiento, los autores obtienen los datos del consumo energético en calefacción y refrigeración, así como el calor absorbido o rechazado por las bombas de calor para condiciones meteorológicas anuales típicas.

Para mayor detalle del establecimiento educacional, sus características constructivas y de climatización, y la metodología de simulación en TRNSYS cabe referirse a Shonder, et al. [10]

Una vez realizado el estudio del presente caso se procedió a la recopilación de todos los datos requeridos por el modelo. Cabe señalar que, dada la magnitud del sistema de climatización del establecimiento, se decidió utilizar únicamente el método directo para el ingreso de las cargas térmicas del edificio. Su simulación a través del método de los grados día, por ser este un método básico, probablemente conduciría a diferencias significativas en cuanto a las cargas energéticas requeridas por el edificio y por tanto al dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado.

A continuación las **Tablas 4 y 5** muestran los datos ingresados al modelo para la determinación del largo del intercambiador de calor y las cargas térmicas del edificio respectivamente.

**Tabla 4: Datos Maxey Elementary School ingresados al modelo**

| PERFORACIONES                   |                     |               |      |
|---------------------------------|---------------------|---------------|------|
| Número de perforaciones         | 120                 |               |      |
| Radio de perforacion            | 0,054               | [m]           |      |
| Distancia entre perforaciones   | 6,096               | [m]           |      |
| Geometría de perforación        | 12 X 10             |               |      |
| Conductividad Térmica Mortero   | 1,73                | [W/m°K]       |      |
| TUBERÍAS Y FLUIDO               |                     |               |      |
| Material                        | Polietileno         |               |      |
| Tipo                            | PE50A               |               |      |
| Presión Nominal                 | PN6                 |               |      |
| Diámetro Nominal                | 1"                  |               |      |
| Distancia centro-centro U-tube  | 0,044               | [m]           |      |
| Fluido                          | Agua/Propilenglicol |               |      |
| % en peso Anticongelante        | 20                  | [%]           |      |
| Temperatura media fluido        | 3                   | [°C]          |      |
| Flujo total del sistema         | 104.400             | [l/h]         |      |
| TERRENO                         |                     |               |      |
| Temperatura imperturbable       | 12,41               | [°C]          |      |
| Conductividad Térmica           | 2,25                | [W/m°K]       |      |
| Capacidad Térmica               | 2,877               | [MJ/m3°K]     |      |
| Difusividad Térmica             | 0,068               | [m2/día]      |      |
| BOMBA DE CALOR                  |                     |               |      |
|                                 | CALEFACCIÓN         | REFRIGERACIÓN |      |
| Temperatura Entrada Fluido      | 4,44                | 23,39         | [°C] |
| COP Bomba de Calor              | 4                   | 4,62          |      |
| Potencia Nominal Bomba de Calor | 598                 | 772           | [kW] |

**Fuente:** Elaboración Propia.

Cabe señalar, de los datos presentados en el cuadro anterior, que la distancia entre ejes del tubo en U se seleccionó considerando una separación equidistante entre las tuberías en U y las paredes de la perforación, que según la literatura [12], corresponde a una configuración típica. Shonder et al. [10] no presentaba un valor en su publicación.

**Tabla 5: Cargas Térmicas de Maxey Elementary School**

| Mes        | Total                | Total                  | Pot. Max.           | Pot. Max.             | Calor              | Calor              |
|------------|----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
|            | Calefacción<br>[kWh] | Refrigeración<br>[kWh] | Calefacción<br>[kW] | Refrigeración<br>[kW] | Absorbido<br>[kWh] | Inyectado<br>[kWh] |
| Enero      | 100.648,1            | 1.141,4                | 523,0               | 45,0                  | 74.405,0           | 3,1                |
| Febrero    | 70.481,7             | 438,1                  | 497,0               | 17,0                  | 52.175,0           | 11,9               |
| Marzo      | 42.614,7             | 3.230,6                | 496,0               | 88,0                  | 29.431,4           | 1.312,8            |
| Abril      | 20.754,2             | 7.428,3                | 265,0               | 116,0                 | 12.120,8           | 5.133,3            |
| Mayo       | 7.797,8              | 27.101,9               | 144,0               | 276,0                 | 1.790,8            | 27.950,6           |
| Junio      | 1.871,4              | 49.993,1               | 67,0                | 442,0                 | 28,1               | 58.388,3           |
| Julio      | 1.560,0              | 66.575,6               | 62,0                | 420,0                 | 0,8                | 78.195,8           |
| Agosto     | 1.408,6              | 69.020,6               | 45,0                | 437,0                 | 10,0               | 80.970,3           |
| Septiembre | 6.036,9              | 25.832,2               | 84,0                | 253,0                 | 1.041,9            | 27.137,5           |
| Octubre    | 17.218,6             | 12.836,7               | 317,0               | 323,0                 | 8.966,1            | 11.095,0           |
| Noviembre  | 59.655,8             | 2.064,4                | 322,0               | 64,0                  | 43.111,9           | 188,9              |
| Diciembre  | 111.155,0            | 1.161,1                | 373,0               | 30,0                  | 82.875,3           | 0,0                |

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 5.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos entregan un largo total de perforación de 10.726,4 [m], lo que corresponde a 89,4 [m] por perforación. La longitud señalada corresponde al modo de calefacción dado que resulta ser la mayor de ambas longitudes obtenidas. La siguiente tabla muestra los principales resultados obtenidos para ambos modos de climatización.

**Tabla 6: Principales resultados Caso 1**

| RESULTADOS                |                                   |                    |             |               |                    |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|---------------|--------------------|
|                           |                                   |                    | CALEFACCIÓN | REFRIGERACIÓN |                    |
| GENERAL                   | Longitud Total                    | L                  | 10.726,4    | 9.918,4       | m                  |
|                           | Longitud por Perforación          | H                  | 89,4        | 82,7          | m                  |
| TERRENO                   | Resistencia Térmica Terreno 6h    | $R_{6h}$           | 0,101       | 0,101         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 1m    | $R_{1m}$           | 0,160       | 0,160         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 10y   | $R_{10y}$          | 0,170       | 0,170         | m <sup>2</sup> K/W |
| PERFORACIÓN               | Resistencia Térmica Convectiva    | $R_{conv}$         | 0,013       | 0,013         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Tubería       | $R_p$              | 0,065       | 0,065         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Mortero       | $R_g$              | 0,076       | 0,076         | m <sup>2</sup> K/W |
|                           | Resistencia Térmica Perforación   | $R_b$              | 0,115       | 0,115         | m <sup>2</sup> K/W |
| BOMBA DE CALOR            | T° salida fluido bomba de calor   | $T_{outHP}$        | 1,11        | 27,96         | °C                 |
|                           | T° media fluido en perforación    | $T_m$              | 2,77        | 25,67         | °C                 |
| INTERACCION PERFORACIONES | Ratio distancia-profundidad       | B/H                | 0,068       | 0,074         | -                  |
|                           | Logaritmo del tiempo adimensional | $\ln(t_{10y}/t_s)$ | -1,280      | -1,123        | -                  |
|                           | Penalización en temperatura       | $T_p$              | -0,235      | 0,242         | °C                 |

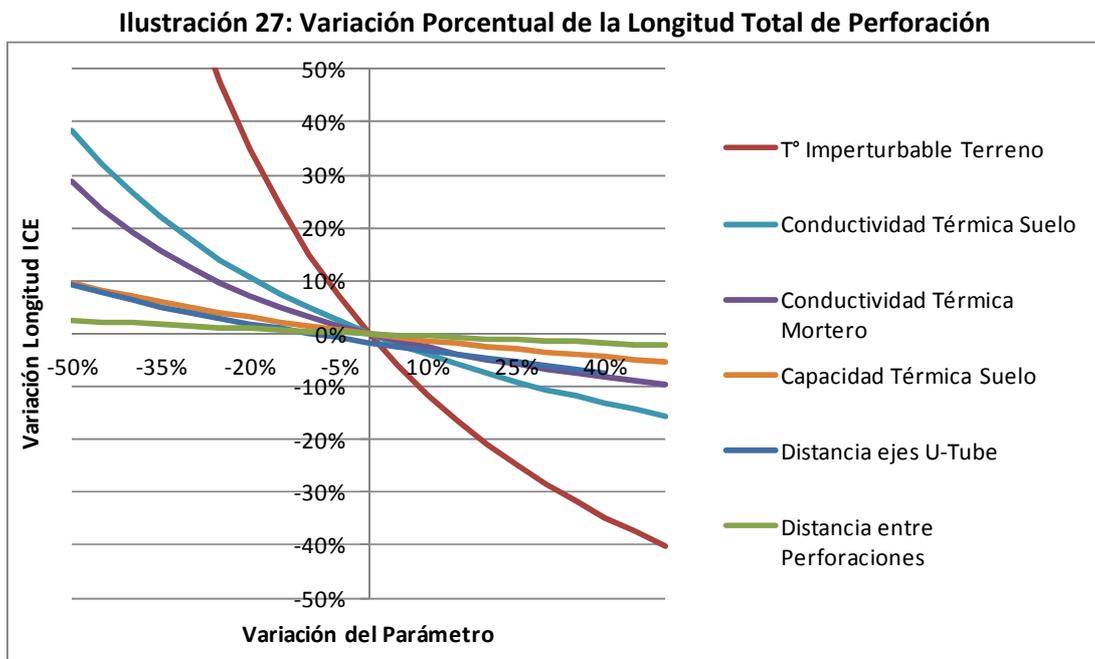
**Fuente:** Elaboración Propia.

Como se señaló, el modo de calefacción es predominante en el sistema y por tanto el que fija la longitud del intercambiador requerido. Se observa además que el valor de penalización en temperatura es relativamente pequeño lo que se explica por el bajo desbalance térmico anual (1,78 [kW])<sup>4</sup>.

Los valores obtenidos por Shonder et al. [10] concuerdan en gran medida con respecto al obtenido por el presente modelo. En el citado artículo se estudian 5 programas de simulación entre los cuales se encuentra TRNSYS. Los valores obtenidos van desde 65 [m] por perforación hasta los 87 [m] por perforación. Si se considera al resultado entregado por TRNSYS (77 [m] por perforación) como el valor de referencia se tiene que el presente modelo entrega un resultado 13% mayor (89,4 [m]) que dicho valor de referencia. Este hecho como se observa a continuación, puede explicarse por posibles diferencias introducidas al tomar la magnitud de separación entre los tubos en U, variable que no se presentaba en la referida publicación y que resulta tener una incidencia no menor en la determinación del largo total del intercambiador de calor enterrado.

### 5.1.3 Análisis de Sensibilidad

Para estudiar el efecto de algunas variables sobre el largo total del intercambiador de calor (Ver **Ilustración 27**) se realizó un análisis de sensibilidad sobre seis variables del modelo. Para realizar este estudio se seleccionó la *temperatura imperturbable del terreno*, la *conductividad térmica de suelo*, la *conductividad térmica del mortero*, la *capacidad térmica del terreno*, la *distancia entre ejes del U-tube* y la *distancia entre perforaciones*.



**Fuente:** Elaboración Propia.

<sup>4</sup> Este y otros resultados parciales pueden ser observados en las respectivas pantallas presentadas en el capítulo anterior.

Para el caso en estudio y como se observa en la figura anterior la *temperatura imperturbable del terreno* corresponde a la variable con mayor efecto en la determinación del largo del ICE. También resultan significativas la *conductividad y capacidad térmica del terreno*, así como la *conductividad térmica del mortero*.

Respecto de la *distancia entre ejes del U-Tube*, única variable no mencionada explícitamente en Shonder et al. [10], se observa que el aumento de un 20% en dicha distancia provoca una disminución de un 3,3% en la longitud total del ICE. Esto corresponde a 86,4 [m] por perforación, magnitud que se encuentra dentro del rango de valores obtenidos por Shonder et al. [10] y que valida aun más la consistencia del presente modelo. Cabe señalar por último, que el aumento de la distancia entre los ejes del U-tube es posible mediante el uso de separadores y que en todo caso está dentro de los límites técnicamente factibles dado el radio de perforación.

## **5.2 Caso 2. Aplicación Residencial. Residencia en Fort Polk**

### **5.2.1 Descripción y datos de modelación**

La residencia en Fort Polk, Louisiana, consiste en un departamento de planta baja el cual tiene un área de ocupación de 98 [m<sup>2</sup>]. La climatización de la vivienda se lleva a cabo con una bomba de calor geotérmica de 5,28 [kW] de potencia nominal y dos perforaciones verticales separadas por 4,88 [m]. Las perforaciones tienen un diámetro de 10,8 [cm] (4¼ in.), una profundidad total de 78,64 [m] cada una y contienen un tubo simple en U de polietileno de alta densidad de 2,54 [cm] (1 in.) de diámetro. Se sabe además que la distancia entre los ejes del tubo en U es de 0,065 [m]. Las perforaciones fueron rellenadas con mortero en base a bentonita y el fluido calo portador es agua pura con un flujo de 1044,6 [l/h]. Considerando las características señaladas y para condiciones ARI Standard 330 (0°C EWT<sup>5</sup> para calefacción y 25°C EWT para refrigeración) los datos de operación del fabricante señalan que se tiene una capacidad de calefacción de 3,63 [kW] con un COP de 3,7 y una capacidad de refrigeración de 5,33 [kW] con un COP de 3,89. En el sistema de climatización de la vivienda domina principalmente la refrigeración con condiciones de diseño en verano de 35°C DB<sup>6</sup> / 25°C WB. Para un año meteorológico típico los grados día en base a 18,3°C en calefacción y refrigeración corresponden a 1895 y 2442 respectivamente.

Al igual que en el caso anterior las cargas térmicas de la vivienda se obtuvieron a partir de la publicación de Shonder et al. [11, 14]. Estas fueron calculadas mediante la simulación en TRNSYS del sistema de climatización de la vivienda. Con el ingreso de las características constructivas del edificio, los parámetros de los equipos de climatización y la calibración del modelo en TRNSYS con datos reales obtenidos en la vivienda, los autores obtienen los datos del consumo energético en calefacción y refrigeración, así como el calor absorbido o rechazado por las bombas de calor para condiciones meteorológicas anuales típicas.

---

<sup>5</sup> EWT: Entering Water Temperature

<sup>6</sup> DB: Dry Bulb; WB: Wet Bulb

Las siguientes tablas muestran los datos ingresados al modelo para la determinación del largo del intercambiador de calor y las cargas térmicas de la vivienda respectivamente. Para mayor detalle de la residencia en Fort Polk, sus características constructivas y de climatización, y la metodología de simulación en TRNSYS cabe referirse a Shonder, et al. [11, 14].

**Tabla 7: Datos Residencia Fort Polk ingresados al modelo**

| PERFORACIONES                   |             |               |           |
|---------------------------------|-------------|---------------|-----------|
| Número de perforaciones         | 1           |               |           |
| Radio de perforacion            | 0,054       |               | [m]       |
| Distancia entre perforaciones   | 4,88        |               | [m]       |
| Geometría de perforación        | 1 X 1       |               |           |
| Conductividad Térmica Mortero   | 0,7         |               | [W/m°K]   |
| TUBERÍAS Y FLUIDO               |             |               |           |
| Material                        | Poliétileno |               |           |
| Tipo                            | PE50A       |               |           |
| Presión Nominal                 | PN6         |               |           |
| Diámetro Nominal                | 1"          |               |           |
| Distancia centro-centro U-tube  | 0,065       |               | [m]       |
| Fluido                          | Agua pura   |               |           |
| % en peso Anticongelante        | 0           |               | [%]       |
| Temperatura media fluido        | 32          |               | [°C]      |
| Flujo total del sistema         | 1.045       |               | [l/h]     |
| TERRENO                         |             |               |           |
| Temperatura imperturbable       | 19,9        |               | [°C]      |
| Conductividad Térmica           | 2,423       |               | [W/m°K]   |
| Capacidad Térmica               | 2,676       |               | [MJ/m3°K] |
| Difusividad Térmica             | 0,078       |               | [m2/día]  |
| BOMBA DE CALOR                  |             |               |           |
|                                 | CALEFACCIÓN | REFRIGERACIÓN |           |
| Temperatura Entrada Fluido      | 0           | 29,44         | [°C]      |
| COP Bomba de Calor              | 4,08        | 3,89          |           |
| Potencia Nominal Bomba de Calor | 3,63        | 5,33          | [kW]      |

**Fuente:** Elaboración Propia.

Dado que la metodología de cálculo está restringida a un número de perforaciones igual a uno, o entre 4 y 144 (**Ecuación 10**), se ha decidido modelar el presente caso con una única perforación. Se considera que este hecho no afectará mayormente el resultado debido a que la interferencia entre perforaciones no debiese ser significativa al tratarse únicamente de dos perforaciones y a que el desbalance térmico anual es pequeño. Por lo tanto, el resultado final obtenido deberá ser dividido en dos para obtener el largo de cada perforación. Por otra parte, el valor de la conductividad térmica del mortero se ha obtenido a partir de referencias bibliográficas [13, 17] ya que no está señalado explícitamente en Shonder et al. [11, 14].

**Tabla 8: Cargas Térmicas de Residencia Fort Polk**

| Mes        | Total Calefacción [kWh] | Total Refrigeración [kWh] | Pot. Max. Calefacción [kW] | Pot. Max. Refrigeración [kW] | Calor Absorbido [kWh] | Calor Inyectado [kWh] |
|------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Enero      | 868,1                   | 0,0                       | 4,6                        | 0,0                          | 645,1                 | 0,0                   |
| Febrero    | 550,4                   | 0,0                       | 4,5                        | 0,0                          | 408,3                 | 0,0                   |
| Marzo      | 344,1                   | 0,0                       | 3,7                        | 0,0                          | 254,1                 | 0,0                   |
| Abril      | 0,0                     | 83,8                      | 0,0                        | 3,2                          | 0,0                   | 97,0                  |
| Mayo       | 0,0                     | 532,8                     | 0,0                        | 4,5                          | 0,0                   | 625,1                 |
| Junio      | 0,0                     | 837,0                     | 0,0                        | 4,8                          | 0,0                   | 987,4                 |
| Julio      | 0,0                     | 1.821,1                   | 0,0                        | 5,3                          | 0,0                   | 2.263,7               |
| Agosto     | 0,0                     | 1.825,5                   | 0,0                        | 5,7                          | 0,0                   | 2.271,6               |
| Septiembre | 0,0                     | 1.205,7                   | 0,0                        | 5,1                          | 0,0                   | 1.491,4               |
| Octubre    | 86,8                    | 97,3                      | 1,2                        | 3,6                          | 58,9                  | 120,2                 |
| Noviembre  | 35,5                    | 0,0                       | 3,6                        | 0,0                          | 26,1                  | 0,0                   |
| Diciembre  | 301,9                   | 0,0                       | 4,4                        | 0,0                          | 223,0                 | 0,0                   |

**Fuente:** Elaboración Propia.

## 5.2.2 Resultados

Los resultados obtenidos entregan un largo total de perforación de 198,4 [m], lo que correspondería según la señalado anteriormente a 99,2 [m] por perforación. Como era de esperar la longitud señalada corresponde al modo de refrigeración dado que la climatización en Fort Polk es intensiva en refrigeración. La siguiente tabla muestra los principales resultados obtenidos para ambos modos de climatización.

**Tabla 9: Principales resultados Caso 2**

| RESULTADOS                |                                   |                    |       |               |       |  |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------|---------------|-------|--|
|                           |                                   | CALEFACCIÓN        |       | REFRIGERACIÓN |       |  |
| GENERAL                   | Longitud Total                    | L                  | 55,2  | 198,4         | m     |  |
|                           | Longitud por Perforación          | H                  | 55,2  | 198,4         | m     |  |
| TERRENO                   | Resistencia Térmica Terreno 6h    | $R_{6h}$           | 0,097 | 0,097         | m°K/W |  |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 1m    | $R_{1m}$           | 0,149 | 0,149         | m°K/W |  |
|                           | Resistencia Térmica Terreno 10y   | $R_{10y}$          | 0,158 | 0,158         | m°K/W |  |
| PERFORACIÓN               | Resistencia Térmica Convectiva    | $R_{conv}$         | 0,004 | 0,004         | m°K/W |  |
|                           | Resistencia Térmica Tubería       | $R_p$              | 0,065 | 0,065         | m°K/W |  |
|                           | Resistencia Térmica Mortero       | $R_g$              | 0,136 | 0,136         | m°K/W |  |
|                           | Resistencia Térmica Perforación   | $R_b$              | 0,171 | 0,171         | m°K/W |  |
| BOMBA DE CALOR            | T° salida fluido bomba de calor   | $T_{outHP}$        | -2,89 | 35,33         | °C    |  |
|                           | T° media fluido en perforación    | $T_m$              | -1,45 | 32,38         | °C    |  |
| INTERACCION PERFORACIONES | Ratio distancia-profundidad       | B/H                | -     | -             | -     |  |
|                           | Logaritmo del tiempo adimensional | $\ln(t_{10y}/t_s)$ | -     | -             | -     |  |
|                           | Penalización en temperatura       | $T_p$              | -     | -             | °C    |  |

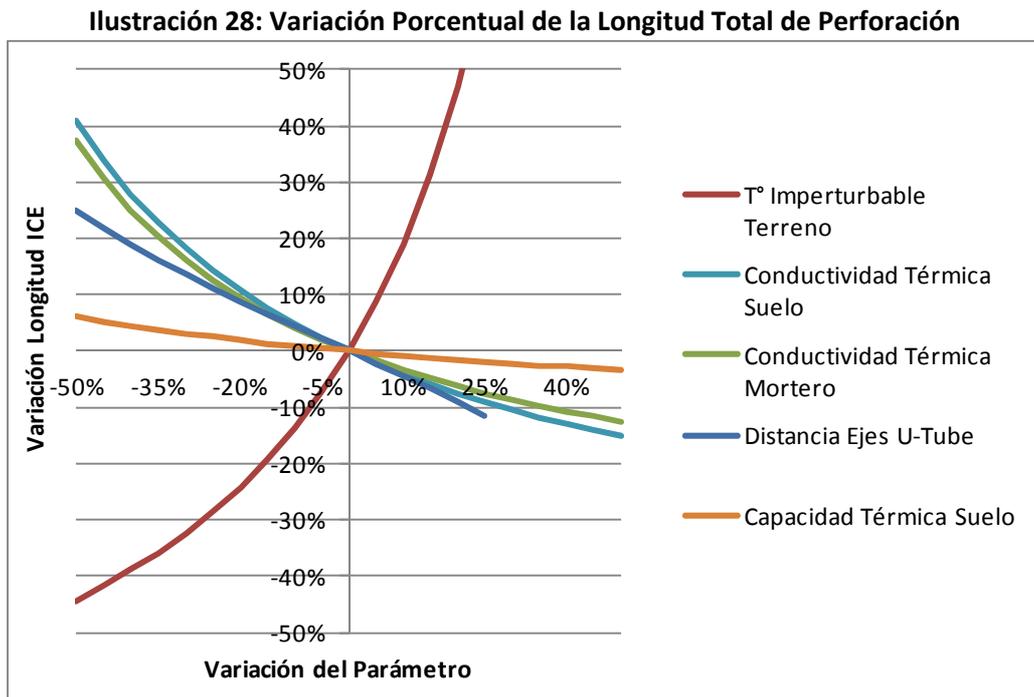
**Fuente:** Elaboración Propia.

Para este caso los valores obtenidos por Shonder et al. [11, 14] nuevamente concuerdan en gran medida con respecto al obtenido por el presente modelo. En el citado artículo se estudian 5 programas de simulación entre los cuales se encuentra TRNSYS. Los valores obtenidos van desde 74 [m] por perforación hasta los 98 [m] por perforación. Si se considera al resultado entregado por TRNSYS (91 [m] por perforación) como el valor de referencia se tiene que el presente modelo entrega un resultado 9% mayor (99,2 [m]) que dicho valor de referencia.

Al igual que en el caso anterior, a continuación se desarrolla un análisis de sensibilidad sobre las mismas variables estudiadas anteriormente con el fin de contrastar sus efectos en los resultados. Dado que en este caso no se contaba con el valor de la conductividad térmica del mortero, su estudiará su variación para observar si el resultado se encontraría dentro del rango de valores entregados por Shonder et al. [11, 14].

### 5.2.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad sobre las variables *temperatura imperturbable del terreno*, *conductividad térmica de suelo*, *conductividad térmica del mortero*, *capacidad térmica del terreno* y *distancia entre ejes del U-tube* entrega los siguientes resultados.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Como se puede observar, para la residencia en Fort Polk el efecto de la temperatura imperturbable del terreno es inverso al provocado en el caso anterior. Esto se explica por el hecho de que el actual caso basa su longitud en la refrigeración mientras que en Maxey Elementary School el largo de perforación esta dado por las cargas requeridas en calefacción.

Respecto de la conductividad térmica del mortero, cuyo efecto en los resultados es similar al caso anterior, se puede señalar que un aumento de un 30% en su valor (0,91 [W/m<sup>2</sup>K]) provoca una disminución en el largo total de perforación de un 8,7%, obteniéndose una longitud por perforación muy similar a la entregada por TRNSYS de 90,5 [m].

Las otras variables analizadas presentan un comportamiento similar al caso anterior en los efectos provocados, aunque la distancia entre ejes del U-Tube tiene una implicancia más significativa para este último caso. Esto se explicaría por el hecho de que al ser una única perforación el efecto de interferencia en transferencias de calor se ve plasmado en la distancia entre ejes del U-Tube y no en la distancia entre perforaciones.

Por último cabe mencionar que el uso del método de los grados día entregó resultados muy dispares respecto de los obtenidos al usar el método directo. Se cree que la falta de información respecto de las características constructivas de la residencia y del uso del sistema de climatización no permitió una buena modelación de la residencia y sus cargas térmicas tanto en calefacción como en refrigeración.

## 6. Conclusiones

Los sistemas GSHP son una alternativa eficiente en la climatización de viviendas y/o edificios comerciales. La topología del sistema será función de las condiciones del lugar y de los requerimientos energéticos de la vivienda presentándose diversas formas de implementación de un sistema GSHP. La topología comúnmente utilizada resulta ser la de intercambiadores de calor vertical enterrado que tienen la ventaja de requerir una menor área para su implementación, no estar sujeta a variaciones climáticas anuales (temperatura constante del terreno) y de poder suplir altas cargas energéticas de climatización al desarrollar una matriz adecuada de perforaciones.

El modelo teórico y la herramienta computacional implementada permiten determinar de manera expedita y sencilla el largo de un intercambiador de calor enterrado vertical según las condiciones previstas por el diseñador del sistema de climatización. Como se pudo observar, los parámetros requeridos para el dimensionamiento del ICE tienen relación y se agrupan principalmente con la topología de las perforaciones, las tuberías y tipo de fluido utilizados, las condiciones del terreno, las cargas térmicas del edificio o vivienda que se desea climatizar y las condiciones técnicas de eficiencia de la bomba de calor.

Los resultados obtenidos, tanto para el caso de validación comercial como residencial, tienen una buena concordancia con los valores entregados por otros modelos y sistemas. Esto nos indica que las funciones correlativas utilizadas resultan ser una manera apropiada de simplificación de los cálculos, pudiendo el modelo por tanto entregar en una primera instancia una aproximación correcta del dimensionado del intercambiador de calor. Con esta información será posible para el diseñador realizar un análisis económico preliminar que le permita discernir acerca de la conveniencia económica de instalar el sistema de climatización geotérmica ya que los principales costos de inversión en un sistema GSHP están dados por las perforaciones que se deben realizar.

Se observa de los análisis de sensibilidad que las variables con mayor efecto en la magnitud del ICE corresponden a aquellas relacionadas con el terreno, esto es, temperatura imperturbable del terreno, conductividad y capacidad térmica de este. Estas variables resultan ser críticas para la determinación del largo del intercambiador y por tanto sus valores deben provenir de fuentes confiables y seguras confirmándose por tanto que las pruebas de respuesta térmica del terreno son estrictamente necesarias para un buen dimensionamiento del intercambiador.

Una desventaja o dificultad del modelo planteado tiene relación con la necesidad de ingresar de manera mensual y precisa las cargas energéticas de la vivienda o edificio tanto para calefacción como para refrigeración. Estos datos son obtenidos a través de sistemas de simulación energética de climatización lo que en cierto modo dificulta el proceso y genera que la herramienta computacional planteada no sea del todo independiente en el dimensionamiento del ICE. Los resultados obtenidos a través del método de los grados día no resultan ser confiables a la hora de compararlos con los obtenidos a través de programas de simulación de cargas energéticas de climatización.

## 7. Referencias

- [1] Ground-Source Heat Pump Project Analysis. RETScreen International.
- [2] Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. 2010.
- [3] Kavanaugh, S.P., K. Rafferty. 1997. *Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, Chap. 3. Atlanta: ASHRAE.
- [4] Eskilson, P. 1987. "Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes." Ph.D. Thesis. University of Lund, Lund, Sweden.
- [5] Philippe, M., Bernier, M., Eng, P., & Marchio, D. (2010). *Vertical Geothermal Borefields*.
- [6] Bernier, M. A. (2006). *Closed-loop ground-coupled heat pump systems*. *Ashrae Journal*, 48(9), 12-25.
- [7] Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems. Design and Installation Standards. 2011 Edition. Oklahoma State University, International Ground Source Heat Pump Association.
- [8] Hellström, G. 1991. "Ground Heat Storage-Thermal Analyses of Duct Storage Systems." Ph.D. Thesis. University of Lund, Lund, Sweden.
- [9] Villarrubia, M. Grados Día y Grados Hora de Calefacción y Refrigeración. Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- [10] Shonder, J. A., Baxter, V. D., Hughes, P. J., & Thornton, J. W. (2000). *A comparison of vertical ground heat exchanger design software for commercial applications*. Oak Ridge National Lab., TN (US).
- [11] Shonder, J. A., Baxter, V., Thornton, J., & Hughes, P. (1999). *A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications*. Oak Ridge National Lab., TN (US).
- [12] Fundamentals of Commercial Geothermal Wellfield Design. Kris Charles Jeppesen. GHP Systems, Inc. 2010.
- [13] Álvarez Currás, R. (2013). Conductividad Térmica de Bentonitas para uso como Relleno en Sondeos Geotérmicos. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo, España.
- [14] Hughes, P. J., & Shonder, J. A. (1998). *The Evaluation of a 4000-home Geothermal Heat Pump retrofit at Fort Polk, Louisiana: Final Report*. Oak Ridge National Laboratory.

- [15] Thermophysical Properties of Brines, Models. M. Conde Engineering, 2011. Zurich.
- [16] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*.
- [17] Bernier, M. A., Chahla, A., & Pinel, P. (2008). Long-Term Ground-Temperature Changes in Geo-Exchange Systems. *ASHRAE Transactions*, 114(2).

## 8. Anexos

### 8.1 Anexo 1

**Coefficientes  $b_i$  y  $c_i$  para función correlativa  $F$**

| $i$ | $b_i$       | $c_i$  |
|-----|-------------|--|
| 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  | ln(t/ts)                                     |
| 5   | -9.4753E-01 | (ln[t/ts]) <sup>2</sup>                      |
| 6   | -6.0416E-02 | (ln[t/ts]) <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) × ln(t/ts)                             |
| 14  | 1.5557E+01  | (B/H) × (ln[t/ts]) <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> × ln(t/ts)                |
| 20  | -5.0454E+01 | (B/H) <sup>2</sup> × (ln[t/ts]) <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  | ln(t/ts) × NB                                |
| 26  | -4.0284E-04 | ln(t/ts) × NB <sup>2</sup>                   |
| 27  | -7.2065E-02 | ln(t/ts) × A                                 |
| 28  | 9.5184E-04  | ln(t/ts) × A <sup>2</sup>                    |
| 29  | -2.4167E-02 | (ln[t/ts]) <sup>2</sup> × NB                 |
| 30  | 9.6811E-05  | (ln[t/ts]) <sup>2</sup> × NB <sup>2</sup>    |
| 31  | 2.8317E-02  | (ln[t/ts]) <sup>2</sup> × A                  |
| 32  | -1.0905E-03 | (ln[t/ts]) <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>             |

8.2 Anexo 2

Principales Características de las Tuberías

| POLIETILENO |               |                    |                     |                  |             |
|-------------|---------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------|
| Tipo        | Presión (Bar) | Diam Nominal (Pul) | DN=Do Exterior (mm) | Di Interior (mm) | Kp (W/m °K) |
| PE32        | 4             | 3/4"               | 20                  | 17,6             | 0,40678     |
|             |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,40678     |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 28               | 0,40678     |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,2             | 0,40678     |
|             |               | 2"                 | 50                  | 44               | 0,40678     |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 55,4             | 0,40678     |
|             | 6             | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,40678     |
|             |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,40678     |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,40678     |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,40678     |
|             |               | 2"                 | 50                  | 40,8             | 0,40678     |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 51,4             | 0,40678     |
|             | 10            | 3/4"               | 20                  | 14,4             | 0,40678     |
|             |               | 1"                 | 25                  | 18               | 0,40678     |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 23,2             | 0,40678     |
| 1 1/2"      |               | 40                 | 29                  | 0,40678          |             |
| 2"          |               | 50                 | 36,2                | 0,40678          |             |
| 2 1/2"      |               | 63                 | 45,8                | 0,40678          |             |
| PE50A       | 6             | 3/4"               | -                   | -                | 0,43        |
|             |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,43        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 28               | 0,43        |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,2             | 0,43        |
|             |               | 2"                 | 50                  | 44               | 0,43        |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 55,4             | 0,43        |
|             | 10            | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,43        |
|             |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,43        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,43        |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,43        |
|             |               | 2"                 | 50                  | 40,8             | 0,43        |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 51,4             | 0,43        |
|             | 16            | 3/4"               | -                   | -                | 0,43        |
|             |               | 1"                 | -                   | -                | 0,43        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 23,2             | 0,43        |
| 1 1/2"      |               | 40                 | 29                  | 0,43             |             |
| 2"          |               | 50                 | 36,2                | 0,43             |             |
| 2 1/2"      |               | 63                 | 45,8                | 0,43             |             |
| PE50B       | 6             | 3/4"               | -                   | -                | 0,29        |
|             |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,29        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 28               | 0,29        |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,2             | 0,29        |
|             |               | 2"                 | 50                  | 44               | 0,29        |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 55,4             | 0,29        |
|             | 10            | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,29        |
|             |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,29        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,29        |
|             |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,29        |
|             |               | 2"                 | 50                  | 40,8             | 0,29        |
|             |               | 2 1/2"             | 63                  | 51,4             | 0,29        |
|             | 16            | 3/4"               | 20                  | 14,4             | 0,29        |
|             |               | 1"                 | 25                  | 18               | 0,29        |
|             |               | 1 1/4"             | 32                  | 23,2             | 0,29        |
| 1 1/2"      |               | 40                 | 29                  | 0,29             |             |
| 2"          |               | 50                 | 36,2                | 0,29             |             |
| 2 1/2"      |               | 63                 | 45,8                | 0,29             |             |

| POLIETILENO  |               |                    |                     |                  |            |
|--------------|---------------|--------------------|---------------------|------------------|------------|
| Tipo         | Presión (Bar) | Diam Nominal (Pul) | DN=Do Exterior (mm) | Di Interior (mm) | Kp (W/m K) |
| PE80         | 6             | 3/4"               | -                   | -                | 0,43       |
|              |               | 1"                 | -                   | -                | 0,43       |
|              |               | 1 1/4"             | -                   | -                | 0,43       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,4             | 0,43       |
|              |               | 2"                 | 50                  | 45,2             | 0,43       |
|              | 2 1/2"        | 63                 | 57                  | 0,43             |            |
|              | 10            | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,43       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,43       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 27,2             | 0,43       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 34               | 0,43       |
| 2"           |               | 50                 | 42,6                | 0,43             |            |
| 2 1/2"       | 63            | 53,6               | 0,43                |                  |            |
| PE100        | 6             | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,43       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,43       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 28               | 0,43       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,4             | 0,43       |
|              |               | 2"                 | 50                  | 45,4             | 0,43       |
|              | 2 1/2"        | 63                 | 58,2                | 0,43             |            |
|              | 10            | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,43       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 21               | 0,43       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 27,2             | 0,43       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 35,2             | 0,43       |
|              |               | 2"                 | 50                  | 44               | 0,43       |
|              | 2 1/2"        | 63                 | 55,4                | 0,43             |            |
|              | 16            | 3/4"               | 20                  | 16               | 0,43       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,43       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,43       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,43       |
|              |               | 2"                 | 50                  | 40,8             | 0,43       |
|              | 2 1/2"        | 63                 | 51,4                | 0,43             |            |
|              | 25            | 3/4"               | -                   | -                | 0,43       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 18               | 0,43       |
| 1 1/4"       |               | 32                 | 23,2                | 0,43             |            |
| 1 1/2"       |               | 40                 | 29                  | 0,43             |            |
| 2"           |               | 50                 | 36,2                | 0,43             |            |
| 2 1/2"       | 63            | 45,8               | 0,43                |                  |            |
| POLIBUTILENO |               |                    |                     |                  |            |
| PB4          | 8             | 3/4"               | 22                  | 17,2             | 0,36       |
|              | 10            | 3/4"               | 22                  | 17,2             | 0,36       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,36       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,36       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,36       |
| PB5          | 8             | 3/4"               | 22                  | 17,2             | 0,38       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,38       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,38       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,38       |
|              |               | 2"                 | 50                  | 40,8             | 0,38       |
|              | 2 1/2"        | 63                 | 51,4                | 0,38             |            |
|              | 10            | 3/4"               | 22                  | 17,2             | 0,38       |
|              |               | 1"                 | 25                  | 20,4             | 0,38       |
|              |               | 1 1/4"             | 32                  | 26,2             | 0,38       |
|              |               | 1 1/2"             | 40                  | 32,6             | 0,38       |
| 2"           |               | 50                 | 40,8                | 0,38             |            |
| 2 1/2"       | 63            | 51,4               | 0,38                |                  |            |

## Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

### Acta d'Avaluació de Projecte

Curs:

Codi UPC: **33563**

Data defensa:

Qualificació:

---

Alumne: Pablo Schoennenbeck Grohnert

DNI: Y2606938-V

Títol: Bombas de Calor Geotérmicas. Diseño de Intercambiadores de Calor Verticales Enterrados.

Director:

Director:

Ponent:

---

### Tribunal

President:

Vocals:

Suplents:

---

### Observacions

### Signatura

|   |  |
|---|--|
| Convocatòria Ordinària,<br>Cognoms, nom (President) | Convocatòria Extraordinària,<br>Cognoms, nom (President) |
| Cognoms, nom (Vocal)                                | Cognoms, nom (Vocal)                                     |
| Cognoms, nom (Vocal)                                | Cognoms, nom (Vocal)                                     |