

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA  
TEMPERATURA PARA APLICACIONES DE CALEFACCIÓN CON  
BOMBAS DE CALOR”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**ABEL GUTIERREZ PACO  
ORLANDO QUISPE CARLO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**"EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA PARA APLICACIONES DE CALEFACCIÓN CON BOMBAS DE CALOR"**

TESIS PRESENTADA POR:

**ABEL GUTIERREZ PACO**

**ORLANDO QUISPE CARLO**



PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 13-ago-2018

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

**PRESIDENTE:**

Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

**PRIMER MIEMBRO:**

Ing. LEONEL MARINO CASTILLO ENRIQUEZ

**SEGUNDO MIEMBRO:**

M. Sc. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

**DIRECTOR / ASESOR:**

M. Sc. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

ÁREA: Energías Renovables  
TEMA: Energía geotérmica

**DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre Celia C. Paco Ñaupá, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones. A mi padre Pedro Gutierrez Sucari (+), a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. A mis hermanos Pilar, Anibal y Katia, a quienes los quiero mucho, por compartir momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento.*

***Abel Gutierrez Paco***

*A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más, A mi madre Marcela Carlo Huaman, por ser la persona que me ha acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y de vida, A mi padre Juan Quispe Cachura quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional. A mis docentes, gracias por su tiempo, por su apoyo, así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.*

***Orlando Quispe Carlo***

## AGRADECIMIENTOS

*Ante todo, agradecemos a Dios por permitirnos llegar a este punto de nuestras vidas, por darnos fuerzas y paciencia necesaria para superar los obstáculos que se presentaron en el desarrollo de este proyecto de tesis.*

*A nuestros padres y hermanos por ser unas personas únicas en nuestras vidas, por tener la paciencia de enseñarnos con amor y aconsejarnos cada día de nuestras vidas siempre con frases positivas hacia el futuro.*

*A nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, por ser el espacio académico que nos brindó la base de nuestros conocimientos y valores para nuestra vida profesional.*

*A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica: porque cada uno de ellos con sus palabras, conocimientos, motivaciones y consejos que nos guiaron nuestra formación a la excelencia ser un profesional integral.*

*Finalmente, nuestro agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma han hecho posible la realización de nuestro proyecto de investigación.*

***Abel Gutierrez Paco & Orlando Quispe Carlo***

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	18
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS. ....	18
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	18
1.4 OBJETIVOS .....	19
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.5 HIPÓTESIS .....	19
1.5.1 HIPÓTESIS GENERAL .....	19
1.5.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	19
<b>2 REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN .....	20
2.2 CONCEPTO Y DEFINICIÓN DE GEOTERMIA.....	21
2.2.1 APLICACIONES Y TIPOS DE LA GEOTERMIA .....	22
2.3 BOMBA DE CALOR .....	24
2.3.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN DE VAPOR.....	26
2.3.2 SISTEMA DE ABSORCIÓN.....	32
2.3.3 RENDIMIENTO DE LAS BOMBAS DE CALOR .....	33
2.3.4 EMISIONES DE EFECTO INVERNADERO.....	35
2.3.5 BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.....	36

2.3.6	FLUIDOS DE TRABAJO.....	40
2.3.7	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA .....	42
2.3.8	MANTENIMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR .....	42
2.4	CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO.....	43
2.4.1	PROPIEDADES TÉRMICAS DE TERRENO.....	43
2.4.2	TEMPERATURA DE LA TIERRA.....	44
2.4.3	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	46
2.5	SISTEMA DE TUBERÍAS .....	60
2.5.1	LAZO ABIERTO .....	61
2.5.2	LAZO CERRADO .....	63
2.5.3	SISTEMAS DIRECTOS CON LÍQUIDO REFRIGERANTE.....	71
2.5.4	ESTIMACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS TUBERÍAS.....	73
2.5.5	SOLUCIONES ANTICONGELANTES .....	73
2.5.6	ESQUEMA DE CONEXIONES MECÁNICAS .....	75
<b>3</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>76</b>
3.1	MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	76
3.1.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	76
3.1.2	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	76
3.1.3	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS .....	78
3.1.4	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	78
3.1.5	UNIDADES DE INFORMACIÓN .....	78
3.1.6	TEMPERATURA DE LA TIERRA EN PAUCARCOLLA .....	79
3.1.7	EVALUACIÓN POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA LOCALIDAD DE PAUCARCOLLA.....	82
3.1.8	COEFICIENTE DE RENDIMIENTO .....	83
3.1.9	PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO.....	84
3.1.10	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN.....	84
3.1.11	DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO .....	84

3.1.12	MODELACIÓN TÉRMICA DEL SUELO ALREDEDOR DEL TUBO COLECTOR ENTERRADO .....	94
3.1.13	IMPLICANCIAS Y OBSTÁCULOS DEL PROYECTO.....	94
3.1.14	. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN.....	94
3.1.15	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	95
3.1.16	VARIABLES .....	95
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>96</b>
4.1	TEMPERATURA DE LA TIERRA EN PAUCARCOLLA.....	96
4.2	ESTIMACIÓN DEL COP .....	101
4.3	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN.....	102
4.3.1	DISEÑO DE INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO .....	102
4.3.2	COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA ALREDEDOR DE UN TUBO ENTERRADO .....	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Principales usos de la energía geotérmica .....	23
Figura N° 2.2 Ciclo de Carnot y bomba de calor .....	28
Figura N° 2.3 Válvula de expansión .....	29
Figura N° 2.4 Nevera doméstica .....	30
Figura N° 2.5 Ciclos anuales de funcionamiento de la bomba de calor geotérmico .....	30
Figura N° 2.6 Sistema compresión de vapor .....	31
Figura N° 2.7 Sistema de absorción.....	32
Figura N° 2.8 COP de la bomba de calor ideal en función de la temperatura de condensación con la fuente de calor a 0°C .....	34
Figura N° 2.9 Bomba de calor geotérmico en modo refrigeración .....	36
Figura N° 2.10 Bomba de calor geotérmico en modo calefacción .....	37
Figura N° 2.11 Modos de instalación de las bombas de calor en edificios: compacto, techo y consola.....	38
Figura N° 2.12 Bomba de calor .....	39
Figura N° 2.13 Temperatura del terreno según la profundidad en Europa .....	45
Figura N° 2.14 Temperatura mundial del suelo en julio de 2006 .....	45
Figura N° 2.15 Determinación de la conductividad térmica .....	46
Figura N° 2.16 Pendiente efectiva de la conductividad térmica .....	50
Figura N° 2.17 Ensayo con sonda de presión y temperatura .....	52
Figura N° 2.18 Temperatura no perturbada del terreno.....	53
Figura N° 2.19 Esquema de equipo de ensayo de respuesta térmica .....	58
Figura N° 2.20 Nivel de agua freática .....	60
Figura N° 2.21 Pozo único y drenaje en terreno.....	61
Figura N° 2.22 Lazo abierto de dos pozos .....	62
Figura N° 2.23 Lazo cerrado horizontal.....	65
Figura N° 2.24 Lazo cerrado espiral.....	67
Figura N° 2.25 Lazo cerrado vertical.....	68
Figura N° 2.26 Lazo cerrado sumergido.....	69
Figura N° 2.27 Lazo cerrado híbrido con estanque o lago .....	70
Figura N° 2.28 Lazo cerrado híbrido con de refrigeración .....	71
Figura N° 2.29 Lazo cerrado híbrido con colector solar.....	72

Figura N° 2.30 Esquema de las conexiones mecánicas de la bomba de calor.	75
Figura N° 3.1 Equipos adquiridos.....	80
Figura N° 3.2 Esquema de instalación de sensores de temperatura .....	81
Figura N° 3.3 Lugar de estudio .....	82
Figura N° 3.4 Esquema Intercambiador Slinky (espiras superpuesta).....	94
Figura N° 4.1 Comportamiento de las temperaturas a distintas profundidades con respecto al tiempo.....	97
Figura N° 4.2 Variación de la eficiencia de Carnot en función de la diferencia de las temperaturas entre la entrada y la salida del evaporador. ....	101
Figura N° 4.3 Comportamiento del coeficiente de rendimiento.....	101
Figura N° 4.4 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la carga térmica de calefacción. ....	106
Figura N° 4.5 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la resistividad de la tierra .....	106
Figura N° 4.6 Comportamiento de la longitud del colector con respecto al factor de utilización .....	107
Figura N° 4.7 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la diferencia de temperaturas. ....	107
Figura N° 4.8 Variación de comportamiento de la temperatura .....	108
Figura N° 4.9 Curva de nivel de temperatura .....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores para 3 tres niveles de rendimiento.....	35
Tabla.2.2 Propiedades físicas de los fluidos más empleados en bombas de calor.....	40
Tabla.2.3 Fluidos de trabajo.....	41
Tabla.2.4 Propiedades de varios tipos de suelos RET Screen internacional ....	44
Tabla.2.5 Datos petrofísicos en muestras de material a lo largo del orificio .....	59
Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo abierto .....	63
Tabla 2.7 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado horizontales .....	66
Tabla 2.8 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado en espiral .	67
Tabla.2.9 Ventajas y desventajas de lazo cerrado vertical .....	69
Tabla 2.10 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado sumergido .....	70
Tabla 2.11 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado con líquido refrigerante .....	72
Tabla 2.12 Longitud estimada de las tuberías.....	73
Tabla 2.13 Comparación de soluciones anticongelantes para circuitos geotérmicos de bomba de calor .....	74
Tabla 3.1 Tabla de instalación de sensores de temperatura .....	82
Tabla 4.1 Temperatura a distintas profundidades en la localidad de Paucarcolla .....	96
Tabla 4.2 Características técnicas de la bomba de calor elegida .....	102
Tabla 4.3 Propiedades del Fluido Elegido .....	103
Tabla 4.4 Especificaciones de la tubería elegida .....	103
Tabla 4.5 Temperatura máxima y mínimas de la tierra .....	104
Tabla 4.6 Características de la instalación del colector.....	107

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Distribución de espacios de las cargas térmicas.....	114
ANEXO 2 Cálculo de las cargas térmicas. ....	114
ANEXO 3 Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales .....	116
ANEXO 4 Características técnicas de la bomba de calor seleccionada .....	117
ANEXO 5 Propiedades físicas de los fluidos.....	117
ANEXO 6 Principales características de los tubos .....	118
ANEXO 7 Cálculo del factor de utilización. Modo calefacción de invierno.....	121
ANEXO 8 Imagen de equipos adquiridos.....	122
ANEXO 9 Imagen de las sondas de temperatura PT-100 .....	122
ANEXO 10 Imagen del lugar de instalación .....	123
ANEXO 11 Imagen de las sondas PT-100 .....	123
ANEXO 12 Imagen de la instalación de las sondas PT-100 en el pozo .....	124
ANEXO 13 Imagen de Sensor para obtención de temperatura de ambiente..	124
ANEXO 14 Imagen del PLC Schneider Electric, .....	125
ANEXO 15 Imagen de la instalación del cable datos de las sondas PT-100 ..	125

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

COP = Coeficiente de performance de calefacción.

K = Conductividad térmica,  $W/m^{\circ}K$

C = Capacidad térmica,  $J/m^3^{\circ}K$

$\alpha$  = Difusividad,  $m^2/s$

Q = Caudal,  $m^3/s$

Re = Número de Reynolds

D = diámetro, m

$\nu$  = Viscosidad cinemática,  $m^2/s$

$T_m$  = Temperatura media de la tierra  $^{\circ}C$

$T_h$  = Temperatura máxima de la tierra,  $^{\circ}C$

$T_l$  = Temperatura mínima de la tierra,  $^{\circ}C$

$X_s$  = Profundidad de la tierra, m

$T_{max}$  = Temperatura máxima de entrada del fluido a la bomba de calor,  $^{\circ}C$

$T_{min}$  = Temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor,  $^{\circ}C$

$D_o$  = Diámetro exterior del tubo, m

$D_i$  = Diámetro interior del tubo, m

$K_p$  = Conductividad térmica del material del tubo,  $W/m^{\circ}K$

$\ln$  = Logaritmo neperiano

$R_p$  = Resistividad térmica del material del tubo,  $W/m^{\circ}K$

$R_s$  = resistividad térmica de la tierra,  $W/m^{\circ}K$

$L_{calefacción}$  = Longitud de tubería de colector, m

$Q_{calefacción}$  = Carga térmica de calefacción, KW

$F_{calefacción}$  = Factor de utilización de calefacción

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como propósito el estudio de la viabilidad de la implementación de energía geotérmica de baja temperatura para la calefacción de viviendas con una fuente inagotable que puede ser extraída de la tierra por medio de bombeo de fluidos calentados en su interior, aprovechando su gran inercia térmica. Para ello se emplearán monitoreo de las temperaturas de la tierra y simulaciones realizadas mediante programas informáticos especializados con el fin de estimar parámetros técnicos necesarios para su viabilidad. Se estimará la potencia necesaria para la bomba de calor. Para hacer uso del calor extraído es necesario integrar el sistema con una bomba de calor, que actuará como intermediaria entre el sistema de intercambio de calor o colector y sistema de distribución interna de la vivienda, aportando el complemento de energía necesario para acondicionar térmicamente el hogar. Tras la realización de los cálculos y elegida una carga típica de un recinto se ha procedido a la elección de la bomba de calor geotérmica, seleccionada en base a criterios energéticos de rendimiento y al dimensionado de la captación geotérmica para el intercambio de calor, un sistema horizontal slinky de 2 m de profundidad.

**Palabras Claves:** energía geotérmica, bomba de calor, slinky; calefacción, temperatura.

## ABSTRACT

The purpose of this project is to study the feasibility of the implementation of low temperature geothermal energy for heating homes with an inexhaustible source that can be extracted from the earth by pumping heated fluids inside, taking advantage of its large thermal inertia. For this purpose, monitoring of earth temperatures and simulations carried out by specialized computer programs will be used in order to estimate technical parameters necessary for their viability. The power required for the heat pump will be estimated. To make use of the extracted heat it is necessary to integrate the system with a heat pump, which would act as an intermediary between the heat exchange system or collector and the internal distribution system of the house, providing the necessary complement of energy to heat the home. After carrying out the calculations and choosing a typical load of an enclosure, the geothermal heat pump has been chosen, selected based on energy performance criteria and the geothermal capacity dimensioning for heat exchange, a system horizontal slinky of 2 m depth.

**Keywords:** Geothermal energy, heat pump, slinky; heating, temperature

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto tiene como propósito el estudio de la viabilidad de la implantación de energía geotérmica de baja temperatura para la calefacción de viviendas. Para ello monitoreos de las temperaturas de la tierra a distintas profundidades, para poder así determinar las temperaturas respectivas, así como también se utilizó software COMSOL Multiphysics con el fin de estimar parámetros técnicos necesarios en su viabilidad. Se estimó la potencia necesaria para la bomba de calor y también el área del terreno necesario para una carga térmica de calefacción en un recinto dado para climatizar. Para hacer uso del calor extraído es necesario integrar el sistema con bomba de calor, que actúa como intermediaria entre el sistema de intercambio de calor o colector y sistema de distribución interna del recinto, aportando el complemento de energía necesaria para acondicionar térmicamente el hogar.

El presente trabajo del proyecto de tesis ha sido elaborado en seis capítulos, siendo el: CAPÍTULO I, se presentan los contenidos de este proyecto de investigación y una breve descripción de la evaluación del potencial geotérmico de baja temperatura, propuesta que busca la viabilidad de la implementación de calefacción con energía geotérmica, fuente inagotable para conseguir las condiciones de confort óptimas en épocas de friaje en nuestras localidades del altiplano.

En el CAPÍTULO II, se presentan los antecedentes de investigación que se realizaron respecto a la presente tesis, precisando de manera clara y concisa la literatura empleada para la elaboración del presente proyecto de Tesis.

En el CAPÍTULO III, se describe la metodología y tipo de investigación, recolección de datos mediante sensores de temperatura PT100, evaluación del potencial geotérmico en la localidad de Paucarcolla y el comportamiento de la temperatura alrededor de un tubo enterrado simulado con software COMSOL.

En el CAPÍTULO IV, se presentan los resultados y discusión realizados desde la obtención de temperaturas a diferentes profundidades de la tierra, selección de sistema de climatización óptima para nuestro estudio, elección de tubería de acuerdo a las temperaturas mínimas y máximas.

Finalmente, en los CAPÍTULOS V - VI, se presentan las conclusiones y recomendaciones a las cuales el presente trabajo del proyecto de Tesis llegó.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las zonas alto andinas de nuestro país, son unas de las más olvidadas; no solo ello, sino también son las zonas donde las personas poseen menos recursos económicos. La temperatura desciende hasta por debajo de los  $-15^{\circ}\text{C}$ , los pobladores sufren en épocas de invierno muy duras, haciendo que lleven una baja calidad de vida.

La ciudad de Puno está ubicada en la sierra sudeste del país, a una altitud media de 3827 msnm, donde la población sufre de bajas temperaturas principalmente en épocas de invierno llegando a veces hasta debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ . El fenómeno del friaje se presenta con descensos extremos, iniciando en el mes de mayo, junio, julio y agosto.

Ante dicho problema, muchas personas adoptan ciertas medidas para luchar contra las bajas temperaturas, algunas de ellas son: sistemas de calefacción por radiadores, estufas, etc. en algunos casos son necesarias fuentes de energías eléctrica que no existen en algunas zonas.

La necesidad de implementación de sistemas térmicos de calefacción en las zonas afectadas basados en energías renovables es la motivación principal de esta tesis.

Por ende, en la presente investigación diseñaremos un prototipo experimental de un sistema de calefacción por piso radiante utilizando PCM. Por sus condiciones climáticas, el departamento de Puno es un buen punto para el desarrollo de este estudio basado en calefacción por energías renovables.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.2.1 Problema General.

¿Será suficiente el potencial geotérmico de baja temperatura para su aprovechamiento en la localidad de Paucarcolla?

### 1.2.2 Problemas Específicos.

- a. ¿Cuál es el área de terreno que se requiere para obtener una temperatura adecuada?
- b. ¿Será viable los sistemas geotérmicos en viviendas y qué sistema es adecuado para una vivienda?
- c. ¿Cuál es la eficiencia que se obtiene de acuerdo a los datos que se recolecta?

## 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a las bajas temperaturas que se registran en la región es una necesidad vital la climatización y/o calefacción de una vivienda para tener el confort.

La climatización mediante la energía renovable tiene como propósito mantener el recinto en temperaturas de confort todo el año para las personas que la utilizan, esto se refiere puntualmente a que en las temperaturas extremas como en el invierno dentro de este espacio exista una temperatura mayor a la del exterior, esto se conoce como calefaccionar el aire que circula dentro del recinto.

Para ello se presenta el proyecto “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA PARA APLICACIONES DE CALEFACCIÓN CON BOMBAS DE CALOR”

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General.**

Evaluar el potencial geotérmico de baja temperatura en la localidad de Paucarcolla.

### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- a. Calcular el área de terreno que se requiere para obtener una temperatura adecuada.
- b. Estudiar la viabilidad de los sistemas geotérmicos en viviendas y determinar el adecuado para una vivienda.
- c. Calcular la eficiencia que se obtiene de acuerdo a los datos medidos.

## **1.5 HIPÓTESIS**

### **1.5.1 Hipótesis General**

Se puede construir sistemas geotérmicos de baja temperatura con bombas de calor en la localidad de Paucarcolla, cuyo uso en calefacción conseguirá confort térmico.

### **1.5.2 Hipótesis Específicas**

- a. Se calcula el área necesaria que se requiere para obtener una temperatura adecuada.
- b. Son viables los sistemas geotérmicos en las viviendas en sus distintas formas.
- c. Se obtiene una buena eficiencia del sistema geotérmica

## CAPÍTULO II.

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

En primer lugar, se tiene que, en febrero del 2014 fue presentado en el departamento de explotación de recursos minerales y obras subterráneas de la escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía. Alorcón (Madrid)

La investigación es un estudio de la aplicación de energía geotérmica de muy baja entalpía para la climatización de un edificio de oficinas en Alorcón (Madrid), para ello se emplearon cálculos teóricos y simulaciones realizadas mediante programas informáticos especializados con el fin de estimar parámetros técnicos necesarios para su viabilidad. Se estimó el suministro de la potencia necesaria a través de tres bombas de calor aire – aguas individuales anteriormente instaladas. El intercambio de calor se realiza a través de sondas geotérmicas U – simple. Se dimensionaron los colectores, bombas de circulación, depósito de inercia y vaso de expansión necesaria para el funcionamiento del sistema. El estudio económico determinó la necesidad de una alta inversión inicial, con una rentabilidad a medio plazo. Además de los beneficios económicos se realizó el estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero demostrando la reducción de los mismos, lo que refleja que además de ser una tecnología económica viable es una energía limpia.

En segundo lugar, se tiene que en diciembre del 2015 fue presentado en el departamento de edificación y urbanismo de la escuela politécnica superior de Alicante. La investigación es un análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos. Aplicaciones a la construcción en Tenerife. Donde indica en resumen que la energía geotérmica constituye una fuente

inagotable de energía que puede ser extraída de la tierra por medio de bombeo de fluidos calentados en su interior, aprovechando su gran inercia térmica. Este intercambio de calor se realiza para proyectos geotérmicos de baja entalpía en pozos de energía o bien por medio del uso de aguas subterráneas.

## 2.2 CONCEPTO Y DEFINICIÓN DE GEOTERMIA

Un estudio etimológico de la palabra Geotermia deduce que es una palabra de origen griego, deriva de “*geos*” que quiere decir tierra, y de “*themos*” que significa calor: **el calor de la tierra**. El término es empleado tanto como para designar a la ciencia que estudia a los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil al ser humano. (Barrio, 2014)

El flujo de calor interno hace uso de los mecanismos de transferencia: conducción y radiación, podemos estimarlo globalmente la radiación en 421012 J/s. De lo expuesto se reduce la existencia de un gradiente térmico del orden de 1°C cada 33 metros. La temperatura superficial media está condicionada por la existencia de la atmósfera y la radiación solar. Esta radiación podemos estimarla en 21017 J/s. la atmósfera contribuye con sus flujos de aire a realizar un proceso de redistribución energético en la superficie y debido a su composición química determina, el intercambio con el espacio, se alcanza así un equilibrio con el flujo solar. Como resultado de estos equilibrios la capa más superficial del terreno alcanza una temperatura superficial media estable estimada en los 15°C. (Pérez Ramirez de Arellano, 2015)

Este calor interno de la tierra tiene orígenes diversos, los principales y más influyentes vienen mostrados a continuación:

- Desintegración de isótopos radiactivos de larga vida presentes tanto en la corteza como en el manto, los más significativos son:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{282}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ .
- Calor inicial que se liberó durante la formación del planeta (datado en 4500 millones de años), y que todavía se está liberando y llegando a la superficie.
- Movimientos diferenciales entre las diferentes capas que constituyen la tierra, principalmente entre manto y núcleo.
- Cristalización de la parte externa (y líquida) del núcleo proceso en el cual se libera continuamente calor, especialmente en la zona de transición al núcleo interno (y sólido). (Seisdedos Sáez, 2012)

Durante numerosos estudios efectuados desde el principio del siglo XX se ha puesto en manifiesto la existencia de un importantísimo flujo térmico desde el interior de la tierra hacia el exterior. Se ha estimado que esta energía o flujo de calor se transmite por conducción, convección y radiación, cuantificándola en  $42 \times 10^{12} \text{ W}$ , del cual  $8 \times 10^{12} \text{ W}$  (2%) son originados en la corteza,  $32,3 \times 10^{12} \text{ W}$  (82%) provienen del manto y  $1,7 \times 10^{12} \text{ W}$  (16%) del núcleo. (Barrio, 2014)

Por consiguiente, podemos definir energía geotérmica como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra.

### 2.2.1 Aplicaciones y Tipos de la Geotermia

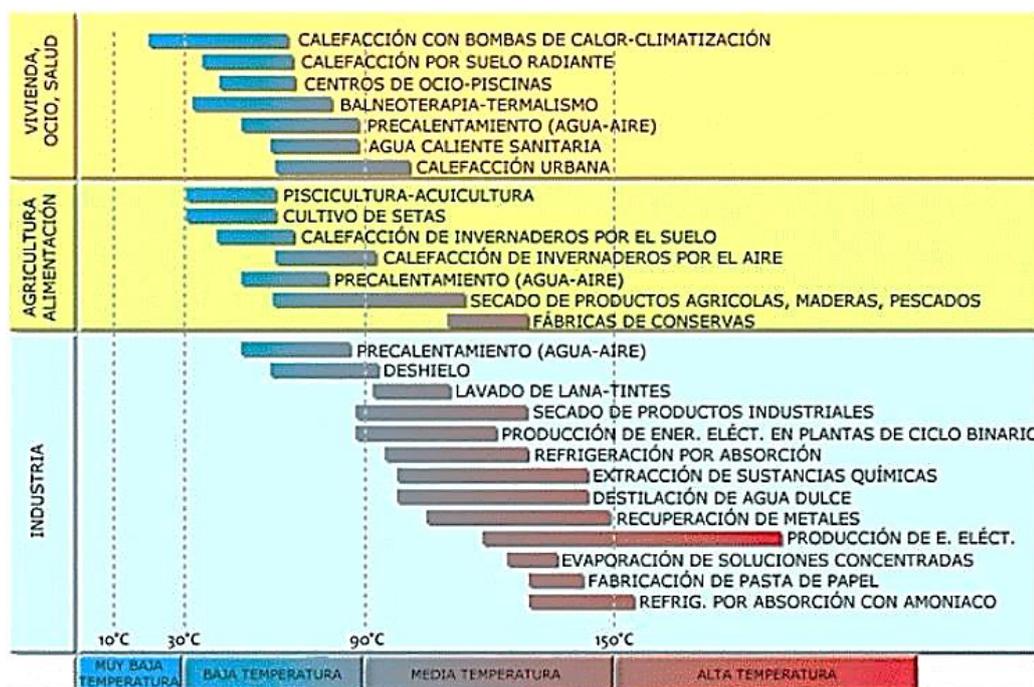
Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía.

**Entalpía** es la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, pueda intercambiar con su entorno. Se expresa en kcal/kg. Como no existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo, pero si

existen sondas térmicas que miden la temperatura, y como la entalpía y la temperatura pueden considerarse, más o menos, proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas de los fluidos geotermales en lugar de sus contenidos su futura aplicación industrial. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

En la tabla se muestran las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura de utilización, y en su parte inferior se establece una agrupación de la energía geotérmica, entre diferentes intervalos de temperatura, en cuatro grandes tipos: muy baja, baja, media y alta temperatura. Diferentes autores establecen límites de temperatura distintas para estos intervalos. La división que aparece en la tabla es la que establece el “código minero” en Francia, y se puede aplicar tanto en la energía geotérmica, como a las explotaciones, los yacimientos y los recursos geotérmicos. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

Figura N° 2.1 Principales usos de la energía geotérmica



Fuente: (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008)

Se establecen las cuatro categorías siguientes para energía geotérmica:

Por lo que respecta a los tipos de recursos geotérmicos, se adopta la clasificación basada en el nivel de temperatura,

**Muy Baja Temperatura menos de 30°C** puede ser utilizada para calefacción o refrigeración y producción de agua caliente sanitaria en edificios de todo tipo mediante el empleo de bombas de calor.

**Baja Temperatura 30°C y 90°C:** su contenido en calor es suficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas.

**Media Temperatura 90°C y 150°C:** permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales.

**Alta Temperatura más de 150°C:** una temperatura superior a 150°C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica. (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008).

Teniendo en cuenta el rango térmico, la energía geotérmica puede ser aplicada en situaciones que van desde la calefacción con bombas de calor, hasta la generación de electricidad donde se requieren focos de alta temperatura.

### 2.3 BOMBA DE CALOR

Una bomba de calor es una máquina que mueve calor, utilizando algún líquido, en sentido opuesto al que tendría que ir naturalmente, por ejemplo, de un espacio o cuerpo frío hacia uno caliente. Esa no es más que una unidad de refrigeración. Todos los dispositivos de refrigeración (aire acondicionado, heladera, freezer, etc.) mueven el calor desde un espacio, para mantenerlo frío, y lo descargan en otro a una temperatura mayor. La única diferencia entre una bomba de calor y un dispositivo de refrigeración es el efecto deseado, el cual es enfriar para el

refrigerador y calentar para la bomba de calor. Una segunda distinción en muchas bombas de calor es que estas son reversibles y pueden ser tanto calentar como enfriar ambientes. Estas necesitan energía eléctrica para operar, pero en condiciones climáticas adecuadas y con un diseño, el balance energético es positivo. Dichas bombas se utilizan en sistema de climatización, utilizando el suelo como referencia térmica, ubicados a temperaturas que van de los 5°C a los 30°C. (Santilli, 2014)

El funcionamiento de la bomba de calor se basa en el principio de Carnot, que en 1824 postuló que la potencia motriz de una máquina térmica es independiente de los agentes que intervienen para realizarla, y que su valor viene fijado únicamente por la diferencia de temperaturas de los cuerpos o fuentes entre los que se hace el transporte calórico. La bomba de calor puede utilizarse en el calentamiento y refrigeración de edificios y en muchos procesos industriales. Contrariamente a lo que ocurre en la naturaleza, en la que el flujo de calor pasa de una temperatura alta a otra más baja, la bomba de calor es capaz de forzar el flujo de calor en la otra dirección, de más baja temperatura a más alta, utilizando una pequeña cantidad de energía en forma de electricidad, combustible o calor perdido. Asimismo, la bomba de calor puede utilizarse en la refrigeración a una temperatura exterior más elevada, es decir, en la dirección contraria natural del flujo de frío que pasa de una temperatura baja a otra alta. La energía de excitación o alimentación de la bomba de calor es pequeña. Por ejemplo, las bombas de calor para calentar edificios que suministran típicamente potencias de 100 kWh precisan de 20 a 40 kWh para funcionar. Por lo tanto, como consumen menos energía que los sistemas caloríficos convencionales, constituyen una tecnología importante para reducir las emisiones de gases que

dañan el medio ambiente, tales como el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), el anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). (Creus Sole, 2008)

Existen dos tipos básicos de bombas de calor, las basadas en la compresión de vapor y las que trabajan con el ciclo de absorción. Otros sistemas, que posiblemente se desarrollarán más en el futuro, son los ciclos Stirling y Vuilleumier, los monofásicos (aire,  $\text{CO}_2$ , o gases nobles), los sistemas de absorción sólido-vapor, los sistemas híbridos que combinan los ciclos de compresión de vapor y de absorción y los procesos electromagnéticos y acústicos.

### 2.3.1 Sistema de compresión de vapor

El procedimiento de compresión de vapor más eficaz para producir un trabajo a partir de dos focos de temperatura es la máquina de Carnot, que es la ideal, utiliza calor para realizar un trabajo. Contiene un gas que se somete a un proceso cíclico de expansión y contracción entre dos temperaturas, fue estudiada por Sadi Carnot alrededor de 1820.

El funcionamiento del ciclo de Carnot, considerando que el sistema está en modo de calefacción y que el gas está contenido dentro de un cilindro dotado de un pistón (compresor), es el siguiente (figura 3) (Creus Sole, 2008)

1. Expansión isotérmica. Inicialmente, el gas ocupa el volumen mínimo  $V_{min}$  a la temperatura  $T_2$  y a presión alta  $P_{alta}$ . En este estado se transfiere calor al cilindro desde la fuente de temperatura  $T_2$  (tierra), con lo que el gas se expande. En este movimiento del pistón, el gas tiende a enfriarse, pero al absorber calor de  $T_2$ , mantiene su temperatura constante. El gas al expandirse produce un trabajo sobre el pistón y

- como la temperatura permanece constante, todo el calor absorbido de  $T_2$  se convierte en trabajo.
2. Expansión adiabática. Al terminar la expansión isotérmica tiene lugar la expansión adiabática (sin intercambio de calor). El gas se enfría hasta alcanzar exactamente la temperatura  $T_1$ , en el momento en que el pistón alcanza el punto máximo de su carrera y el gas alcanza su volumen máximo  $V_{max}$ .
  3. Compresión isotérmica. La salida de calor, debida a la fuente de calor de temperatura  $T_1$ , comprime el gas, pero éste no aumenta su temperatura porque va cediendo calor a la fuente fría (ambiente vivienda).
  4. Compresión adiabática. Durante el resto de la compresión el gas eleva su temperatura hasta alcanzar exactamente el valor  $T_2$  mientras que el volumen del gas llega a su valor mínimo  $V_{min}$ .

El coeficiente de funcionamiento COP (Coefficient Of Performance) es la relación entre el calor de salida del sistema y la energía eléctrica consumida en el compresor y en las unidades que mueven el fluido de transferencia de calor (bomba de agua en el caso de la energía geotérmica).

El ciclo de compresión cerrado está basado en el ciclo ideal de Carnot operando entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Su expresión es:  $COP_C = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

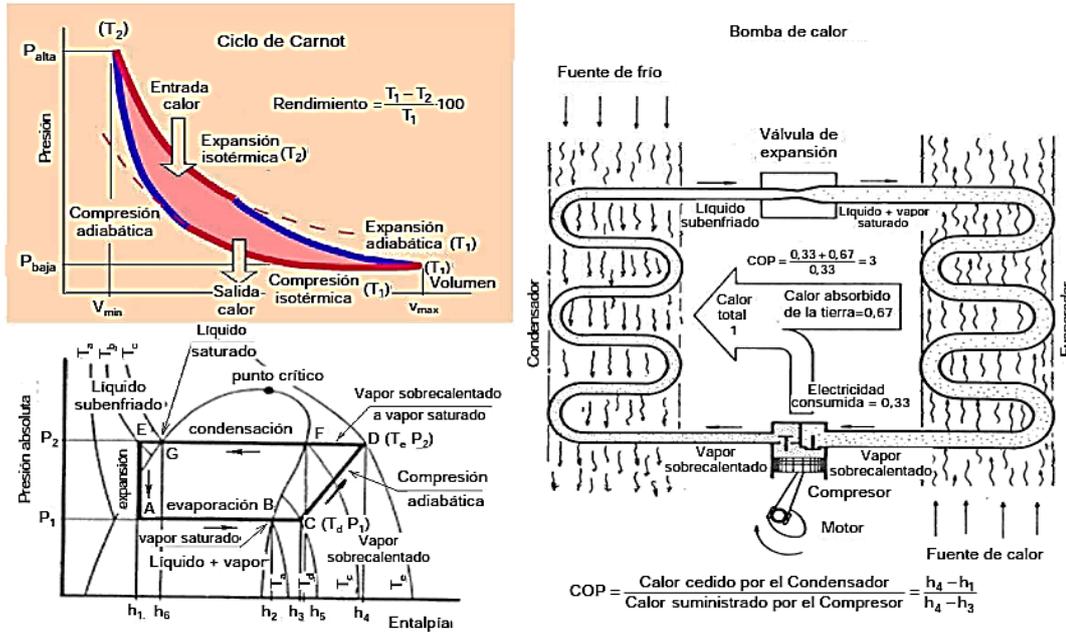
Por ejemplo, el mayor rendimiento que puede conseguirse en el ciclo de Carnot para  $T_1 = 323$  K y  $T_2 = 300$  K es de 7,12%.

Y en el caso del ciclo real, con  $n_c =$  rendimiento Carnot, resulta:

$$COP = n_c \cdot COP_C$$

Los pasos anteriores aplicados a la bomba de calor pueden verse en la misma figura en el diagrama de presión – entalpía de la bomba de calor.

Figura N° 2.2 Ciclo de Carnot y bomba de calor



Fuente: (Creus Sole, 2008)

Hay que señalar que la bomba de calor que utiliza el ciclo de Carnot tiene un rendimiento totalmente diferente, gracias a que aprovecha la energía (temperatura) de la tierra, con lo que sólo es necesario un pequeño aporte de energía eléctrica en el motor del compresor para obtener un rendimiento (COP) que en la figura 2 resulta ser de 3, es decir, que por cada kilovatio consumido se obtienen aproximadamente tres o más.

La gran mayoría de las bombas de calor trabajan con este sistema. La bomba de calor más simple es la nevera doméstica (figura 4) que utiliza el principio de compresión de vapor y se compone de:

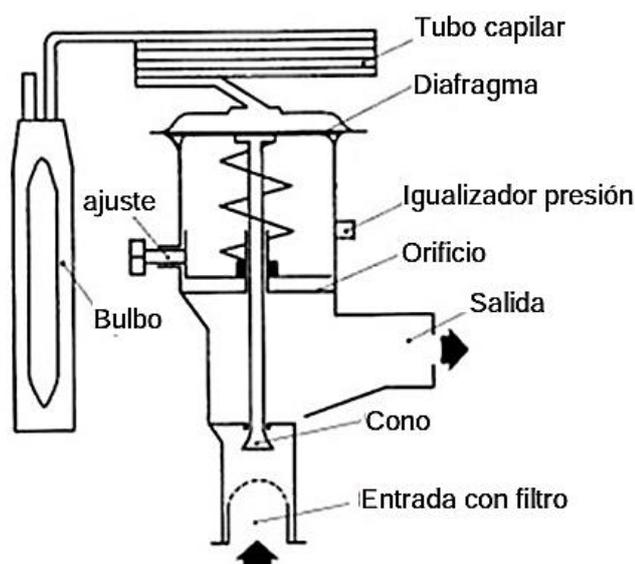
### 2.3.1.1 Compresor

Aumenta la presión y temperatura del vapor del refrigerante. Condensador – Condensa el vapor del refrigerante a líquido.

### 2.3.1.2 Válvula de expansión

Provoca una caída de presión en el refrigerante, con lo que este se vaporiza. Es normalmente termostática con un cuerpo de válvula montado en la tubería del líquido refrigerante, un tubo capilar y un bulbo colocados en la salida del evaporador.

Figura N° 2.3 Válvula de expansión



Fuente: Danfoss

### 2.3.1.3 Evaporador

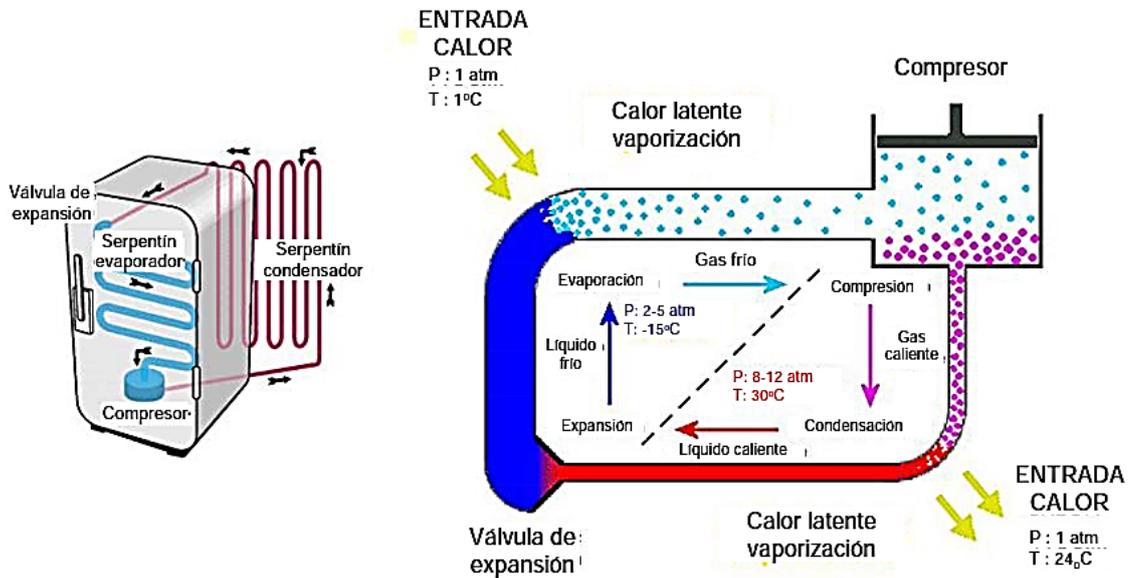
Donde se enfría la caja de la nevera al absorber el calor latente de vaporización del refrigerante.

Si el refrigerante utilizado es el R134a (tetra-fluoroetano), la presión del evaporador debe ser de 1,6 atm para conseguir una temperatura de vaporización de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si se emplea el R717 (amoníaco) los valores de presión del evaporador y del condensador son respectivamente de 2,3 atm y 11,5 atm, para la misma temperatura de vaporización de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La bomba de calor es semejante a la nevera, pero dispone de componentes adicionales que permiten enviar calor en cualquiera de los dos sentidos, de modo que el mismo equipo puede refrigerar o calentar.

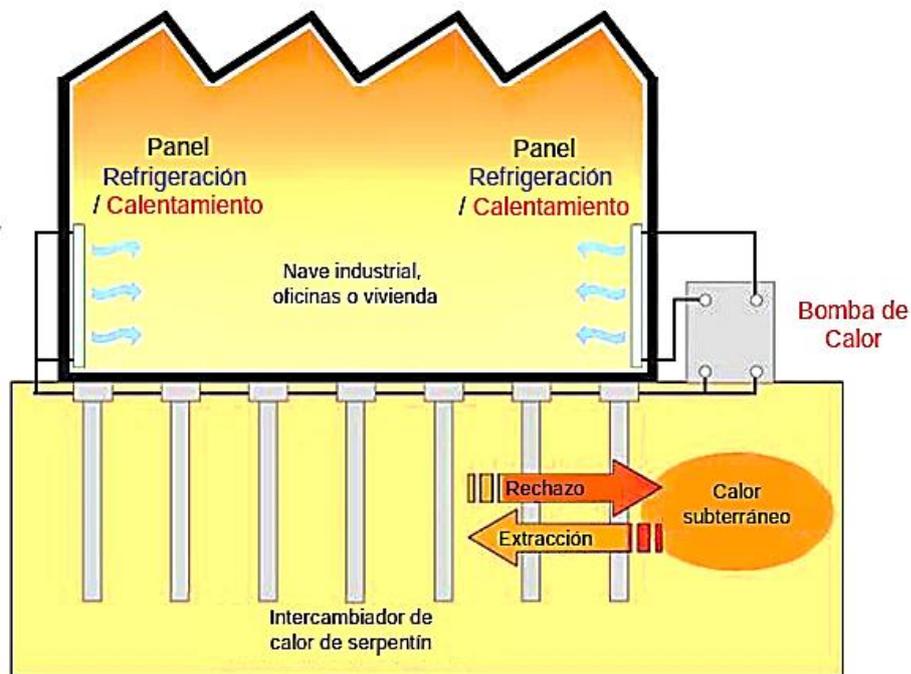
El sistema está formado por el compresor, la válvula de expansión y los dos intercambiadores de calor, el evaporador y el condensador (figura 4). El fluido de trabajo o refrigerante es un líquido volátil que circula a través de los componentes descritos.

Figura N° 2.4 Nevera doméstica



Fuente: (Creus Sole, 2008)

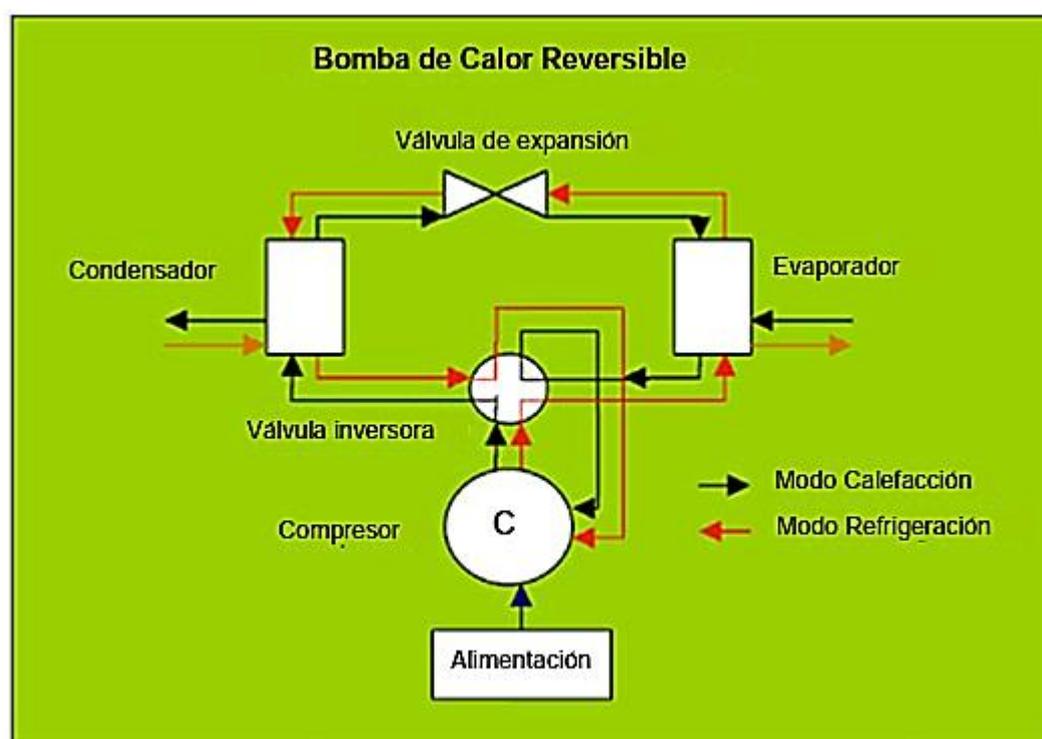
Figura N° 2.5 Ciclos anuales de funcionamiento de la bomba de calor geotérmico



Fuente: (Creus Sole, 2008)

En el modo de calefacción, la temperatura del fluido de trabajo en el evaporador se mantiene más baja que la temperatura de la fuente de calor. De este modo, el calor fluye de la fuente de calor al líquido, con lo que el fluido de trabajo se evapora. El compresor comprime este vapor a una alta presión y alta temperatura. El vapor así comprimido entra en el condensador donde pasa al estado líquido, liberando en la condensación un calor útil. Y finalmente el líquido condensado que se encuentra a una presión elevada se expande en la válvula de expansión y retorna a su estado inicial de presión y temperatura y el ciclo se repite nuevamente.

Figura N° 2.6 Sistema compresión de vapor



Fuente: (Creus Sole, 2008)

Para cambiar el sentido del sistema se dispone de:

Una válvula de inversión de 4 vías que puede invertir el caudal del fluido refrigerante en el lazo, pero sin modificar la dirección del caudal a través del compresor.

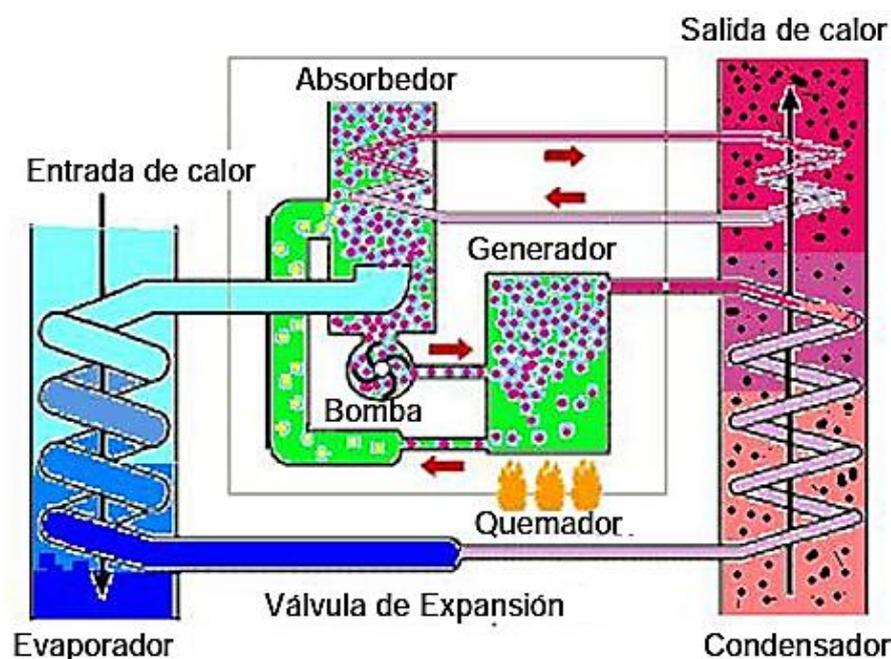
Una válvula de expansión bidireccional que permite el flujo del refrigerante en cualquier dirección.

De todos los componentes descritos, el único que precisa energía es el compresor, que la obtiene de un motor eléctrico o bien en algunas ocasiones de un motor de combustión. El rendimiento del sistema dependerá pues de la forma con que es generada la alimentación del motor del compresor.

### 2.3.2 Sistema de absorción

Los ciclos de absorción son análogos a los de compresión, únicamente se sustituye el compresor por un circuito de disoluciones que realiza la misma función que este, es decir, eleva la presión y temperatura del fluido frigorífico en estado vapor. El circuito de disoluciones, consiste en un absorbedor, una bomba que impulsa la disolución, un generador y una válvula de expansión. Se obtiene energía térmica a media temperatura en el condensador y en el absorbedor. En el generador se consume energía térmica a alta temperatura, y en la bomba energía mecánica. (Rodríguez Fernandez, 2012)

Figura N° 2.7 Sistema de absorción



Fuente: (Rodríguez Fernandez, 2012)

El vapor del fluido de trabajo es absorbido por líquidos o sales que tienen esta propiedad de absorción. Los más comunes son:

Agua como fluido de trabajo y bromuro de litio (absorbente).

Amoníaco como fluido de trabajo y agua (absorbente).

En el ejemplo del amoníaco como fluido de trabajo, el vapor de baja presión del evaporador es absorbido por la sustancia absorbente (agua) del absorbedor, generándose calor.

El absorbente (agua) es bombeado a alta presión y entra en el generador, donde el fluido de trabajo (amoníaco) entra en ebullición mediante una fuente externa de calor (calefactor) que está a alta temperatura. El fluido de trabajo (amoníaco) en estado de vapor se condensa en el condensador, mientras que la sustancia absorbente (agua) retorna al absorbedor a través de la válvula de expansión.

De este modo, en el evaporador se extrae calor de la fuente que lo genera y en el condensador y absorbedor, a temperaturas medias, se extrae calor útil. En el generador se suministra calor a alta temperatura para la marcha del proceso. La bomba puede precisar alimentación eléctrica de poca potencia.

En la industria, el calor perdido puede aprovecharse en el proceso de absorción de agua y bromuro de litio, suministrándolo al evaporador y al generador.

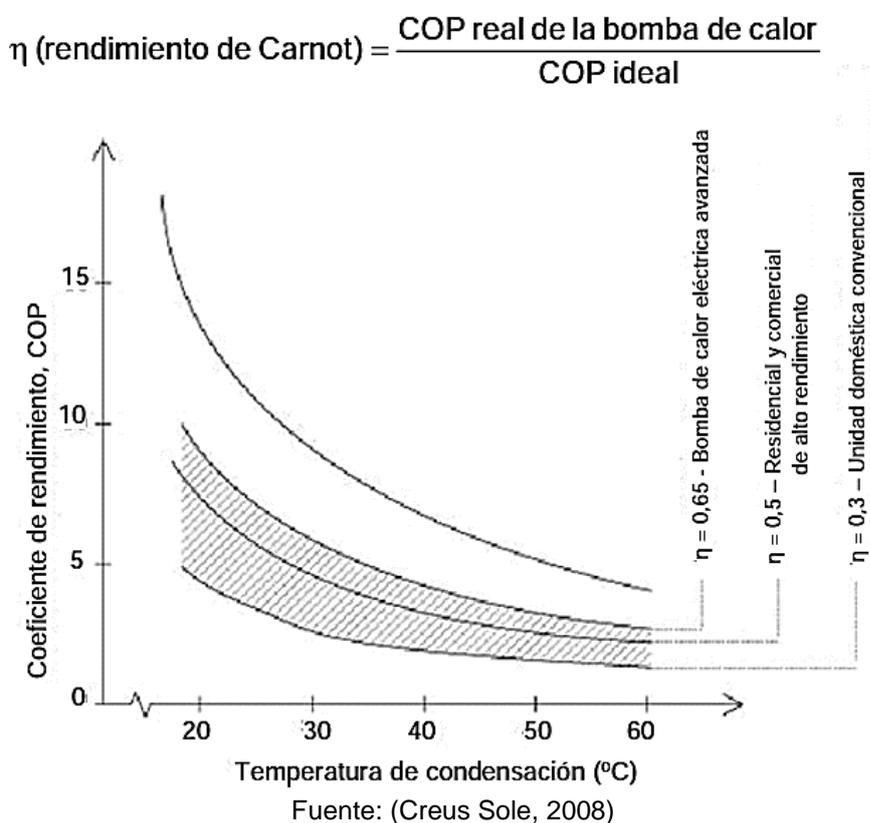
### **2.3.3 Rendimiento de las bombas de calor**

El rendimiento de la bomba de calor se mide con el coeficiente de rendimiento (COP – Coefficient Of Performance) que es la relación entre el calor de salida y la energía eléctrica necesaria para actuar sobre el compresor y la bomba eléctrica del líquido que circula por el serpentín enterrado. (Creus Sole, 2008)

Dependiendo de las condiciones de operación los valores típicos del COP varían entre 2 a 1 y 5 a 1. El valor más alto corresponde al calentamiento de suelos, ya que la temperatura deseada es de 30 a 35 °C menor que la requerida por los radiadores.

En la figura 7 pueden verse los valores del COP para varias temperaturas de condensación y diversos tipos de unidades de bombas de calor, con la fuente de calor a 0°C y siendo  $\eta$  el rendimiento de Carnot de expresión: (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.8 COP de la bomba de calor ideal en función de la temperatura de condensación con la fuente de calor a 0°C



Por lo tanto, el COP de 5 indica que las bombas de calor son muy eficientes ya que consumen poca energía (usualmente en forma eléctrica) y rinden 5 veces más que la energía que gastan.

El promedio de estos valores es el factor de rendimiento estacional (SPF – Seasonal Performance Factor) de expresión:

$$SPF = \frac{\text{Calor entregado durante la estación}}{\text{Energía suministrada durante la estación}} \tag{2.1}$$

Los valores de rendimiento de la bomba de calor se determinan bajo condiciones de ensayo definidas por la CSA (Canadian Standards Association) norma 446 o por el instituto ARI (Air Conditioning and Refrigeration Institute) normas 320 y 330. En la tabla 1 pueden verse los valores de COP para tres niveles de rendimiento. (Creus Sole, 2008)

Tabla 2.1 Valores para 3 tres niveles de rendimiento

Valores de COP para tres niveles de rendimiento		
Nivel de rendimiento	COP en calefacción. Temperatura agua a la entrada de la bomba de calor= 10°C (Bomba de calor), Temperatura agua a la entrada de la bomba = 0°C (Bomba de calor acoplada). Temperatura Interior = 21°C	COP en refrigeración. Temperatura agua a la entrada de la bomba de calor = 21°C (Bomba de calor), Temperatura agua a la entrada de la bomba = 25°C (Bomba de calor acoplada). Temperatura Interior = 26,7°C
Estándar	2,8	3,5
Medio	3,2	4,5
Alto	4	5,5

Fuente: (Creus Sole, 2008)

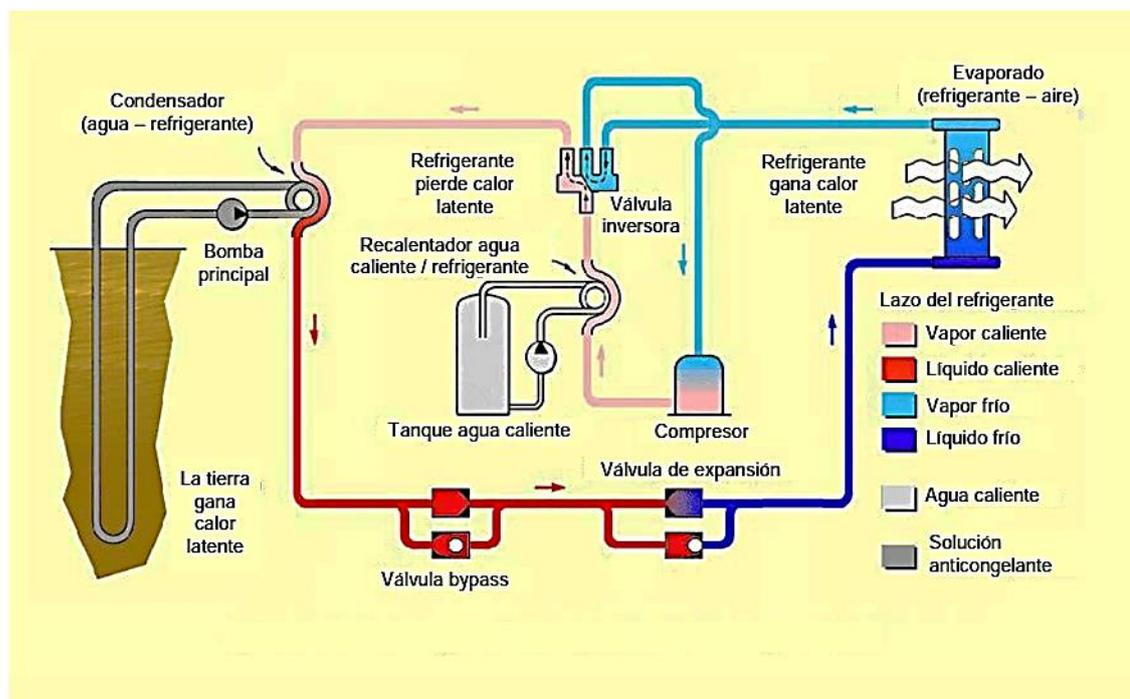
### 2.3.4 Emisiones de efecto invernadero

La energía consumida en las bombas de calor se emplea en mover o desplazar calor. La bomba de calor precisa energía para accionar el compresor. Dependiendo de la energía que se utilice en este accionamiento, las emisiones asociadas podrán provenir de fósiles (caso de energía eléctrica generada por centrales que consuman fuel-oil o carbón), de gas natural o bien estas emisiones estarán compensadas en el caso de energías renovables. Por ejemplo, en Inglaterra la bomba de calor empleada en calefacción y agua caliente, produce el 55% de emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de calentamiento doméstico de gas natural.

### 2.3.5 Bomba de calor geotérmica

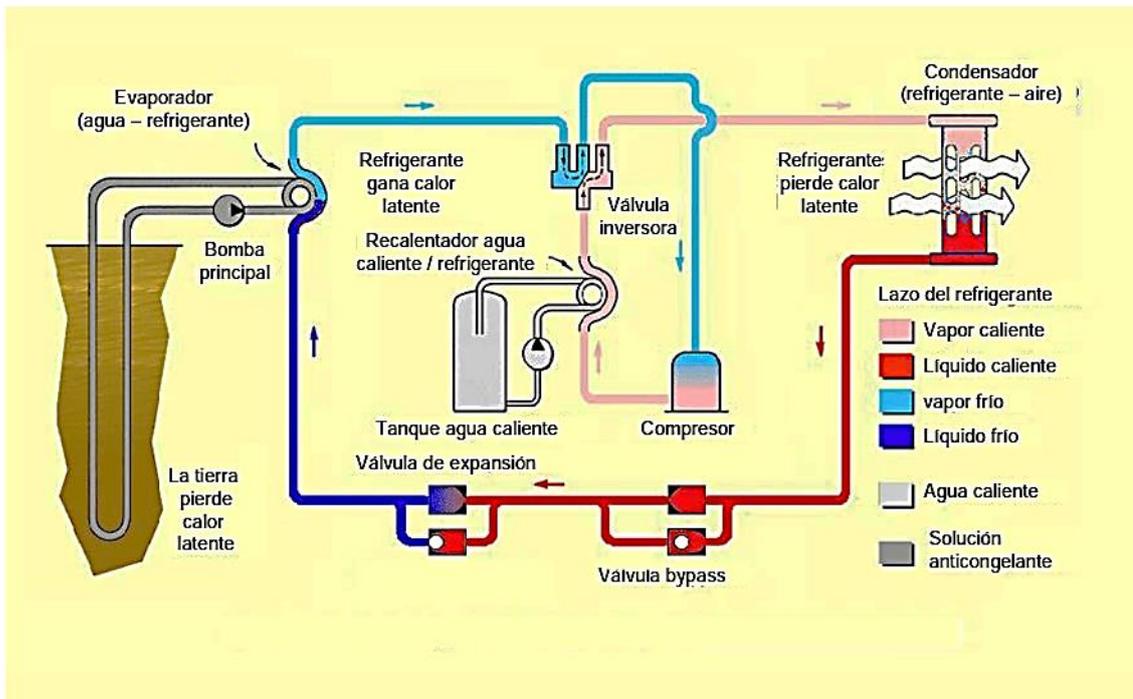
Según (Creus Sole, 2008). Hay dos tipos básicos de sistemas geotérmicos, el de lazo abierto sujeto a restricciones de sanidad local, ya que el agua aspirada se devuelve al río, a una laguna o a un segundo pozo y el de lazo cerrado. En el sistema de lazo cerrado circula una solución anticongelante, como fluido de transferencia, por el bucle de tuberías que puede estar enterrado a 2 m en el caso de lazos horizontales o hasta 100 m en los lazos verticales, dependiendo del espacio disponible en el terreno. En verano (figura 10) el terreno es más frío que el aire con lo que el bucle de tuberías condensa el refrigerante a temperaturas más bajas, mientras que en invierno (figura 11) es al revés y el bucle de tuberías evapora el refrigerante a temperaturas más altas.

Figura N° 2.9 Bomba de calor geotérmico en modo refrigeración



Fuente:RETSscreen

Figura N° 2.10 Bomba de calor geotérmica en modo calefacción



Fuente: (Creus Sole, 2008)

El rendimiento de la bomba de calor se mide en los modos de calentamiento y refrigeración y viene expresado respectivamente como COP h (h = heating - calentamiento) y COP c (c = cooling ± refrigeración).

Se calcula dividiendo la capacidad calorífica o de refrigeración del sistema por la energía utilizada para que funcione. Por ejemplo:

$$\text{Modo calentamiento} - \frac{\text{Capacidad calorífica sistema}}{\text{Potencia compresor + bomba + ventilador}} = \frac{10,4 \text{ kW}}{3,25 \text{ kW}} = 3,2 \quad (2.2)$$

La Relación de Eficiencia de Energía (EER - Energy Efficiency Ratio) es una medida del rendimiento en el modo de refrigeración y representa la relación entre la capacidad total de refrigeración del sistema y la energía eléctrica de alimentación.

Se calcula según la norma CSA standard C748-94 Performance of Direct Expansion (DX) Ground Source Heat Pumps conditions.

El intercambiador agua/refrigerante, refrigerante/aire y todos los lazos del refrigerante pueden estar montados en un contenedor único en posición horizontal, vertical o en una consola.

Figura N° 2.11 Modos de instalación de las bombas de calor en edificios: compacto, techo y consola



Fuente: (Creus Sole, 2008)

Dependiendo de los fluidos de entrada y de salida, las bombas de calor pueden ser:

**2.3.5.1 bombas de calor aire – agua**

Se extrae el calor del aire exterior y se transfiere a los locales a través de un circuito de agua a baja temperatura.

**2.3.5.2 bombas de calor aire – aire**

Se extrae el calor del aire exterior y se trasfiere a los locales a través de los conductos de aire.

**2.3.5.3 bombas de calor agua – agua**

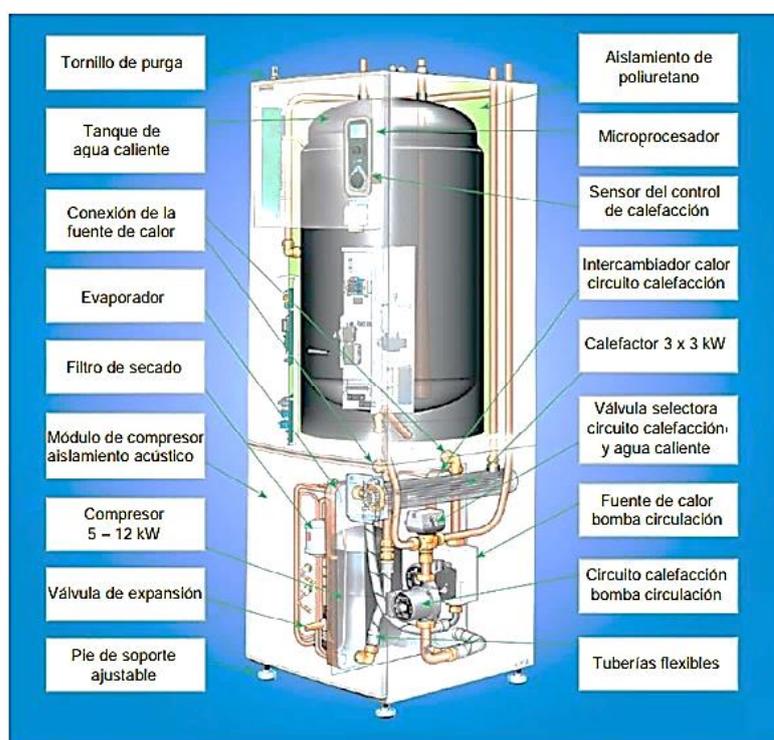
Utilizan como fuente de calor el de la tierra o el del gua freática, o de los ríos, lagos, etc. Y trasfieren el calor a radiadores.

**2.3.5.4 Bombas de calor agua – aire**

Utilizan la misma fuente de calor anterior (tierra o agua freática de los ríos o lagos) y lo trasfieren mediante aire a conductos situados en la vivienda o edificio.

Las bombas de calor geotérmicas son básicamente agua - agua y agua – aire. En la figura puede verse una bomba de calor.

Figura N° 2.12 Bomba de calor



Fuente: NIBE

### 2.3.6 Fluidos de trabajo

El fluido empleado en estos es agua con anticongelante, para prevenir el riesgo de congelación debido al elevado funcionamiento en calefacción o temperaturas muy frías del terreno.

La elección del fluido circulante radica en estos factores:

- Características de transferencia de calor, es decir conductividad térmica y viscosidad
- Punto de congelación
- Requerimientos y caídas de presión por razonamiento
- Corrosividad, toxicidad e inflamabilidad
- Coste del fluido

*Tabla.2.2 Propiedades físicas de los fluidos más empleados en bombas de calor*

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol	Metanol
Densidad a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12	-26
Punto ebullición °C	100	197	187	64
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371	2,47021
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	0,655	9,5	18,0	0,45
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 <sup>-3</sup>	0,60	0,26	0,20	0,21

Fuente: (Espada, 2012)

El lazo externo de la bomba de calor, que está enterrado, contiene un líquido anticongelante del tipo propilenglicol, alcohol desnaturalizado o metanol. El lazo interno contiene refrigerante el punto muy bajo de ebullición. Hasta hace pocos años se utilizaban tradicionalmente hidroclorofluorocarbonos (HCFC) en los aparatos de aire acondicionado y en las bombas de calor; debido al impacto que ejercen en el ozono de la atmósfera y a su contribución al calentamiento global de la Tierra, se han dictado normas para su sustitución en el sentido de proteger

la capa de ozono y frenar y contener los efectos adversos sobre el clima. (Creus Sole, 2008)

En la tabla pueden verse las alternativas a estos fluidos de trabajo. En rojo se indican los refrigerantes prohibidos y en amarillo los todavía utilizables pero que dejarán de emplearse en Europa a partir del año 2014.

Tabla.2.3 Fluidos de trabajo

Familia de Fluidos	Temperatura	Temperatura máxima	Aplicación	ODP (potencial agotamiento ozono)	GWP (potencial calentamiento global)	COP (Coeficiente de rendimiento)	Toxicidad	Observaciones
<b>CFC - Clorofluorocarbano</b>			Prohibidos (1-1-1996)	1	4,680 - 10,720			Tienen 2 átomos de cloro y son muy estables en la atmósfera (100 años)
R-11				1				
R-12	Baja y media	80°C		0,95	Alto			
R-114	Alta	120°C		Alto	Alto			
<b>HCFC - Hidroclorofluorocarbano</b>			Prohibidos en Europa a partir 2014	0,02 - 0,06	76 - 2270			Un solo átomo de cloro Vida 2 a 28 años
R22	Baja	55°C	Bombas de calor geotérmicas	0,055	1500			Prohibidos en Europa a partir 2014
R-32			Sustituye al R-22	0	650			Prohibidos en Europa a partir 2014
<b>HFC - Hidrofluorocarbano</b>				0	122 - 14310			Igual que HCFC con el fluor que sustituye a algunos hidrógenos
R-134a				0	1300	Igual que el CFC-12	Baja	Prohibidos en Europa a partir 2014
R-152a			Sustituye al R-500	0	140			Prohibidos en Europa a partir 2014
R-125			Semejante al R-502 y al R-22	0	2800			Prohibidos en Europa a partir 2014
R-143a			Semejante al R-502 y al R-22	0	3900			Prohibidos en Europa a partir 2014
<b>PFC - Perfluorocarbano</b>				0	5820-12010			
R-14					6500			
<b>PFC - Perfluorocarbano</b>				0	5820-12010			
R-14					6500			
<b>Mezclas</b>								
R410a = Mezcla de R32 y R125			Bombas de calor geotérmicas	0	1730	Mejor que el R-22 (5 a 6% mayor)		Compresor más pequeño, mayor presión de operación (50% mayor) 6% mayor poder refrigeración que el R22
R-500	Media	80°C	Restringido					Mezcla azeotrópica de gas refrigerante R-12 y gas refrigerante R-152a con aproximadamente el 74% de gas refrigerante R-12
R-502	Baja y media	80°C	Restringido					
R-508B								
R407-C			Bombas de calor geotérmicas	0	1530			Mala curva temperatura
<b>Fluidos de trabajo naturales</b>								
Amoníaco (NH <sub>3</sub> ) - R-717			Alternativa a CFC y R-22	0	< 1		Tóxico a partir de 1750 mg/m <sup>3</sup> . Es más ligero que el aire	Ideal en pequeños sistemas. No es compatible con el cobre
CO <sub>2</sub> - R-744				0	1	Bajo		No tóxico, no inflamable - refrigerante secundario
Hidrocarburos (Propano R-290, Butano R-600)				0	3		Alta inflamabilidad	Bombas de calor industriales de alta temperatura
Agua (H <sub>2</sub> O) - R-718				0	0			Bombas de calor industriales de alta

Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.3.7 Ventajas e Inconvenientes de la Bomba de calor Geotérmica

Entre las ventajas figuran: (Creus Sole, 2008)

- Se eliminan todas las unidades exteriores con lo que el sistema está protegido contra la corrosión, robo, vandalismo y mantenimiento exterior.
- El espacio exterior ocupado por las tuberías en contacto con la tierra queda cubierto por el terreno.
- Se eliminan las resistencias eléctricas típicas de las bombas de calor aire-aire.

Y entre los inconvenientes:

- El coste inicial de unas 2,5 veces el de los otros equipos, debido especialmente al coste de los pozos.
- El periodo de amortización de la inversión crece si aumenta el rendimiento en energía del edificio.

### 2.3.8 Mantenimiento de la Bomba de calor

El mantenimiento adecuado ahorra problemas y es rentable. La falta de mantenimiento puede dar lugar a averías en el sistema geotérmico, en especial en la bomba de calor con lo cual es posible que el usuario se vea obligado a acudir a otras fuentes de energía más caras en su consumo. La diferencia entre un buen y un mal mantenimiento puede llegar al 10-25% de energía consumida innecesariamente. (Creus Sole, 2008)

El fabricante de la bomba de calor proporciona un manual de mantenimiento en el que se detalla la lista de revisiones para el técnico especialista. Una estimación de las revisiones a efectuar es:

- Inspeccionar conductos, filtros y serpentines para eliminar obstrucciones y suciedad.
- Reparar fugas que puedan existir en el circuito de aire.
- Comprobar si hay fugas de refrigerantes y cargar con uno nuevo si es necesario.
- Inspeccionar los terminales eléctricos y apretar las conexiones que se hayan aflojado.
- Lubricar los motores e inspeccionar las correas de transmisión (tensión y desgaste).
- Verificar el funcionamiento eléctrico con el termostato, comprobando que la calefacción se bloquea si le pide frío y a la inversa.
- Verificar el funcionamiento correcto del termostato.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO.

El terreno tiene una influencia importante en el tamaño del intercambiador de calor de la instalación geotérmica, debido a sus características propias de transferencia de calor, es decir a su conductividad.

### 2.4.1 Propiedades térmicas de terreno.

La **Conductividad térmica** es una propiedad característica del material que indica su capacidad para conducir el calor.

La **capacidad térmica** o calorífica es el cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de la temperatura provocada.

La **difusividad térmica** se define como la ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. (Espada, 2012)

Como la tierra no es homogénea ni en composición ni en densidad, y es afectada por la humedad, las características térmicas (conductividad térmica del terreno)

pueden variar significativamente con la profundidad. De este modo, a no ser que se conozca el valor medio de la conductividad de la zona, que siempre está sujeto es recomendable realizar un test de conductividad térmica del terreno. Dentro de los tipos de montaje del intercambiador de calor (tuberías enterradas), en el llamado de lazo cerrado horizontal, la red de tuberías se dispone en trincheras paralelas, a una profundidad de 1 a 3 metros, de modo que en este caso el ensayo térmico es inmediato y con un coste ínfimo. No ocurre así en los de lazo cerrado vertical, donde la red de tuberías descansa en pozos de pequeño diámetro a profundidades que pueden alcanzar los 100-150m. En este caso, se recomienda realizar el ensayo. (Creus Sole, 2008)

En la tabla 4 pueden verse las propiedades de ocho diferentes tipos de suelos.

*Tabla.2.4 Propiedades de varios tipos de suelos RET Screen internacional*

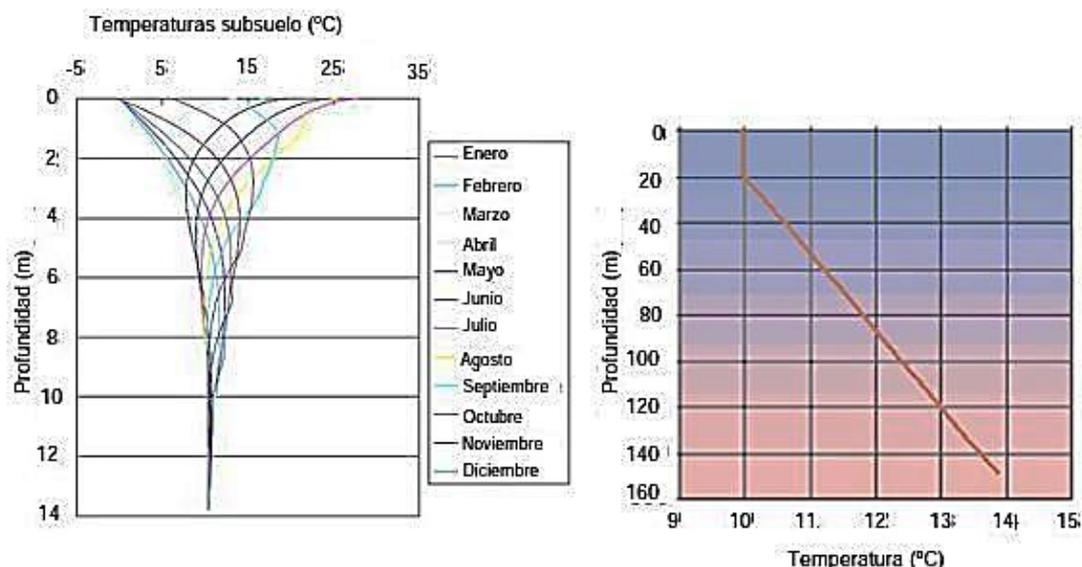
Propiedades de varios tipos de suelos				
Tipo de suelo	Conductividad W/m °C	Difusibilidad m <sup>2</sup> /s	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Capacidad calorífica kJ/kg. °C)
Flojo, húmedo (arena suelta, lodo)	0,9	0,000000516	1600	1,05
Flojo, seco (arena suelta, lodo)	0,3	0,000000284	1400	0,84
Denso, húmedo (Caliza, arena compactada, barro)	1,3	0,000000645	2100	0,96
Denso, seco (Caliza, arena compactada, barro)	0,9	0,000000516	2000	0,84
Roca ligera (caliza)	2,4	0,00000103	2800	0,84
Roca pesada (granito)	3,5	0,00000129	3200	0,84
Escarcha ligera	1,4	0,0000011	1580	0,76
Escarcha densa	2	0,00000137	2070	0,69

Fuente:RETscreen Internacional

### 2.4.2 Temperatura de la Tierra

La temperatura de la tierra se considera que es la temperatura media de las profundidades mayores a 15 m.

Figura N° 2.13 Temperatura del terreno según la profundidad en Europa

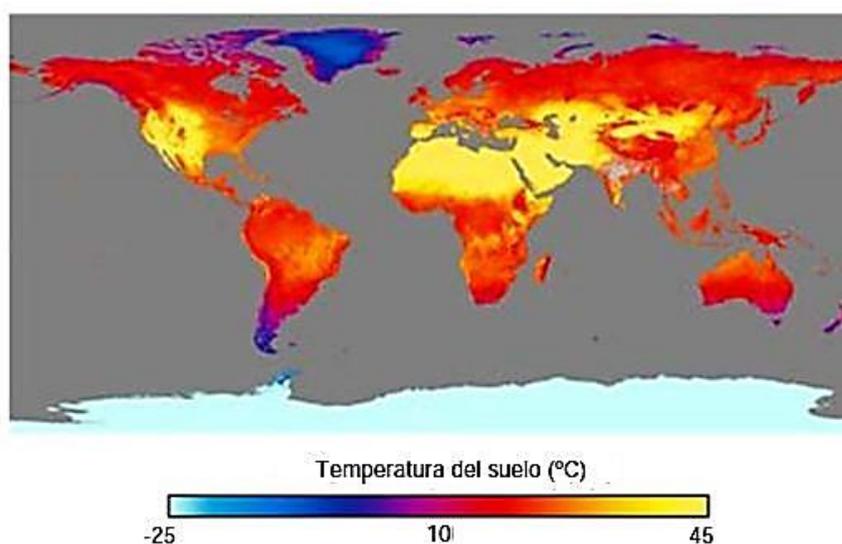


Fuente: (Creus Sole, 2008)

La temperatura media de la tierra, hasta la profundidad de unos 14 m, varía entre 0°C (condiciones de escarcha) hasta unos 25°C, dependiendo de la latitud y de la estación del año (figura). La temperatura es constante a partir de los 20 m de profundidad y aumenta aproximadamente 1°C por cada 33 m. (Creus Sole, 2008)

La NASA mediante una base de datos de satélite facilita la temperatura del suelo alrededor del globo.

Figura N° 2.14 Temperatura mundial del suelo en julio de 2006



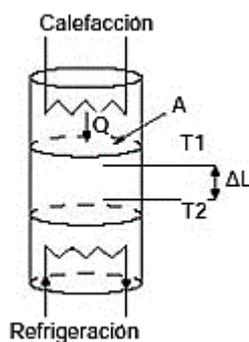
Fuente: (Creus Sole, 2008)

Los valores anteriores corresponden a valores medios de temperatura del terreno, pero tal como se ha dicho, la única forma de obtener valores fidedignos que permitan hacer un cálculo fiable de las necesidades de la instalación es la realización de un ensayo térmico de perforación. Este permitirá calcular las conductividades térmicas a distintas profundidades y la conductividad media. Además, estos valores podrán confirmarse con el análisis de los materiales componentes y a partir de ellos derivar a la conductividad térmica y la temperatura media del terreno.

### 2.4.3 Conductividad Térmica.

Según (Creus Sole, 2008) indica que la conductividad térmica es muy importante para determinar la longitud del orificio de perforación (pozo) requerido y la separación entre perforaciones.

Figura N° 2.15 Determinación de la conductividad térmica



Fuente: (Creus Sole, 2008)

La conductividad térmica viene definida por:

$$k = \frac{Q/A}{\Delta T/\Delta L} \quad (2.3)$$

En la que:

$Q$ ; Calor que pasa a través de una sección  $A$

$\Delta T$ ; Diferencia de temperaturas a través de la distancia  $\Delta L$

$Q/A$ ; Flujo calorífico debido al gradiente de las temperaturas  $\Delta T/\Delta L$

### 2.4.3.1 Modelos de los cálculos de conductividad

Los cálculos de la conductividad se basan en las características geométricas del terreno y consideran el flujo de agua freática, la porosidad de los estratos y la heterogeneidad del pozo en toda su profundidad. Además, el volumen del terreno utilizado por los ensayos de respuesta térmica es idéntico al que empleará después el intercambiador de calor (tubo en U-terreno) si la instalación sigue adelante. (Creus Sole, 2008)

Existen cuatro modelos de evaluación de la determinación de la conductividad térmica del terreno:

Modelo análisis de fuente lineal continua basado en la transmisión de un flujo de calor constante desde a una línea situada a lo largo del eje vertical del orificio considerando como un sólido infinito. (Creus Sole, 2008)

La temperatura del fluido se toma en el radio del orificio ( $r = r_b$ ) y se añade el efecto de la resistencia térmica  $R_b$  entre el fluido y la pared del orificio.

La variación de la temperatura en función del tiempo  $t$  y del radio del orificio  $r$ , a lo largo de una línea con un flujo de entrada constante de calor  $q$ , es: (Creus Sole, 2008)

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (2.4)$$

Con:

$q$ ; Tasa de inyección calorífica por unidad de longitud del orificio

$\lambda$ ; Conductividad térmica

$H$ ; Profundidad efectiva del orificio de perforación

t; Tiempo después de la aplicación de la inyección de calor

a; Difusibilidad térmica  $=\lambda/c$  con  $c_p$ ; capacidad calorífica específica

r; Radio del orificio

el valor del tiempo t suele estar 10 a 20 horas.

La integral exponencial  $E_1$ , para valores de  $(at/r^2)>5$ , puede aproximarse a la relación:

$$E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \tag{2.5}$$

En la que:

$\gamma$ : 0.577215664 es la constante Euler

Siendo

$\lambda$ ; Conductividad térmica de la tierra

$c_p$ ; Capacidad calorífica específica de la tierra

O bien una aproximación de la integral  $E_1$  es:

$$E_1 \approx -\gamma - \ln x + A \cdot x - B \cdot x^2 + D \cdot x^3 - E \cdot x^4 + F \cdot x^5 \tag{2.6}$$

En la que:

A=	B=	D=	E=
0,99999193	0,24991055	0,05519968	0,00976004
F=	y= 0,5772	$\frac{r_b^2}{4a_{tierra} - t}$	
,00107857			

## 1- Modelo análisis de fuente lineal continua simplificado

Al inyectar calor, la relación entre la temperatura del fluido y la temperatura en la pared del orificio es:

$$T_f^q(t) = T_b^q(t) + q \cdot R_b \quad (2.7)$$

En la que:

$R_b$ ; resistencia térmica entre el fluido contenido en las tuberías y la pared del orificio

$Q$ ; cambio de temperatura debido al pulso de calor  $q$

Luego el flujo de temperatura en función del tiempo puede escribirse en la forma: (Creus Sole, 2008)

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[ \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4a}{r_b^2} \right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_0 \right] \quad \text{para } t \geq \frac{5r_b^2}{a} \quad (2.8)$$

En la que:

$$T_f(t); \text{ Temperatura media del flujo de trabajo} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$$

$Q$ ; Potencia inyectada (W)

$\lambda$ ; Conductividad térmica (W/m K)

$H$ ; Profundidad efectiva del orificio de perforación (m)

$T$ ; Tiempo después de la aplicación de la inyección de calor (s)

$a$ ; Difusibilidad térmica ( $\lambda/c$  con  $c_p$  capacidad térmica) ( $m^2/s$ )

$r_b$ ; Radio del orificio (m)

$\gamma$ ; Constante de Euler (0,5772)

$R_b$ ; Resistencia térmica (K/(Wm))

$T_0$ ; Temperatura no perturbada de la tierra (°C)

La expresión anterior puede considerarse como una recta de ecuación:

$$T_f(t) = k \cdot \ln t + m \tag{2.9}$$

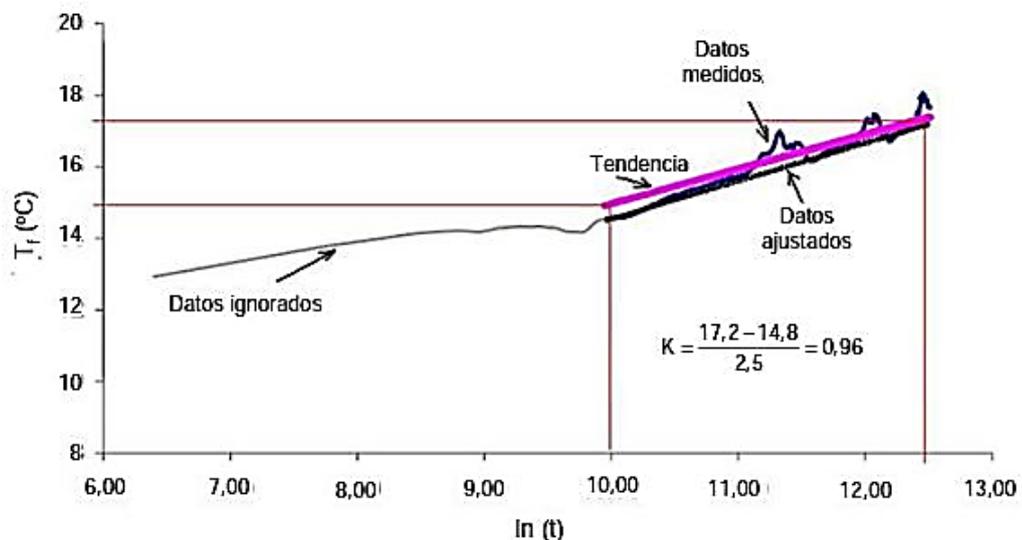
Con

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad m = \left[ \frac{Q}{H} \left( \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4a}{r_b^2} \right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_0 \right] \tag{2.10}$$

Por lo tanto, determinando la pendiente de la temperatura media del fluido con relación al logaritmo neperiano de la curva de tiempo, será posible determinar el valor de  $\lambda$ . (Creus Sole, 2008)

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H} \tag{2.11}$$

Figura N° 2.16 Pendiente efectiva de la conductividad térmica



Fuente: (Creus Sole, 2008)

En la figura puede verse que la pendiente efectiva es de 0,96. Luego:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi kH} = \frac{9000}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,96 \cdot 100} = 3,73(W/mK) \quad (2.12)$$

En la expresión inicial de  $T_f$  (flujo de temperatura en función del tiempo) y a partir del valor de  $\lambda$  (conductividad térmica (W/m K)) se determina  $R_b$  (resistencia térmica entre el fluido de trabajo y las paredes del orificio) ( K/(Wm)), mediante la fórmula: (Creus Sole, 2008)

$$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left( \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right) \quad (2.13)$$

Donde:

$T_f$ ; Temperatura media del fluido de trabajo

$T_0$ ; Temperatura no perturbada de la tierra (°C)

$H$ ; Profundidad efectiva del orificio de perforación (m)

$Q$ ; Potencia inyectada (W)

$\lambda$ ; Conductividad térmica (W/m K)

$a$ ; Difusibilidad térmica ( $m^2/s$ ) (orden de magnitud:  $10^{-6}m^2/s$ )

$t$ ; Duración de la fase de calentamiento (s)

$r_b$ ; Radio del orificio (m)

$\gamma$ ; Constante de Euler (0,5772)

Sustituyendo valores resulta:

$$R_b = \frac{100}{9000} \cdot (16 - 13,8) - \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,73} \cdot \left( \ln\left(\frac{4 \cdot 0,000001 \cdot 50}{0,25^2}\right) - 0,5772 \right) = 0,158 \quad (2.14)$$

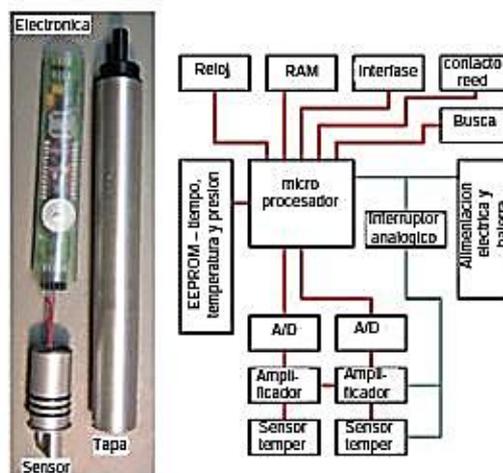
En este método simplificado se obtiene exactitudes de:

$$\lambda = \pm 0,05 W/mK \quad (2.15)$$

$$R_b = \pm 0,005 k/(wm) \quad (2.16)$$

En una variante del método se utiliza una sonda de temperatura y presión que registra estos valores durante el descenso de la parte superior al fondo de la perforación, gracias a un microprocesador, programado para tomar datos, contenido en un tubo metálico cerrado que puede soportar hasta 100 bar. Una vez ha llegado al fondo es devuelto a la superficie mediante una pequeña bomba. En la superficie se conecta a un ordenador, recuperándose los datos grabados. Una vez se ha estabilizado la temperatura, el tiempo necesario para el conjunto de medidas de un pozo de 300 m. de profundidad es de unos 60 minutos. (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.17 Ensayo con sonda de presión y temperatura



Fuente: geowat AG

El cálculo de la conductividad térmica se basa en la conducción. Antes deben eliminarse los efectos de los cambios en la temperatura del terreno y la influencia de la capa freática.

Partiendo del perfil de temperatura medio, se calcula el gradiente geométrico local capa a capa mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta T_i = \frac{T \text{ parte superior de la capa} - T \text{ parte inferior de la capa}}{\text{profundidad parte superior de la capa} - \text{profundidad parte inferior de la capa}} \quad (2.17)$$

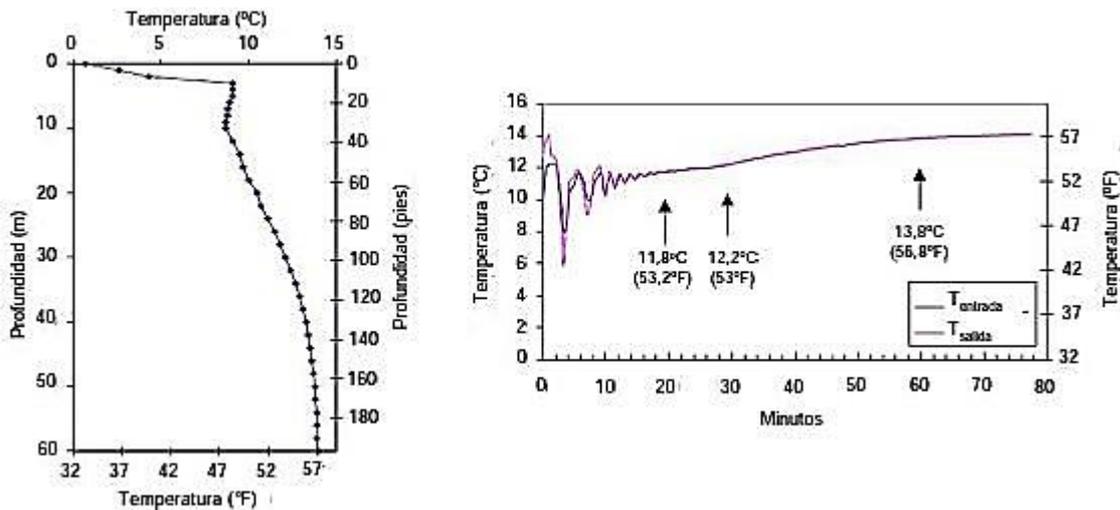
Y la conductividad térmica de cada capa individual es:

$$\lambda = \frac{\text{flujo calorífico local}}{\Delta T_i} \quad (2.18)$$

En la figura 18 pueden verse los resultados obtenidos con la sonda en terrenos próximos a Zurich (Suiza), comparados con las medidas realizadas en el laboratorio, viéndose que la concordancia es muy buena. Este método es pues altamente fiable para la obtención de conductividades térmicas in situ.

Para determinar  $T_0$  (temperatura no perturbada de la tierra) se perfora el orificio y antes de realizarla el test de respuesta térmica TRT, se llena con agua el orificio y se introduce un sensor de temperatura. Se baja el sensor midiéndose la temperatura cada metro hasta llegar al fondo del orificio. La curva resultante permite determinar la temperatura no perturbada de terreno.

Figura N° 2.18 Temperatura no perturbada del terreno



Fuente Universidad tecnologica Lulea Suecia.

Una vez realizada la medición, se conecta el resto del equipo de respuesta térmica, con el calefactor desconectado, y se registran las temperaturas de entrada y salida cada 10 segundos, con sensores de respuesta rápida. Las oscilaciones iniciales de la temperatura desaparecen al cabo de unos 15 minutos

y la pendiente se estabiliza a los 60 minutos. Con los dos métodos se encuentra una  $T_0$  de 13,8°C.

## 2- Modelo análisis de fuente cilíndrica

Para tiempos muy largos o cilindros de pequeño diámetro de longitud infinita y flujo de calor constante, se verifica:

$$T(t) = T_{ug} + \frac{Q}{4\pi\lambda_{tierra} \cdot H} \cdot \left( 2h + \ln \frac{4\tau}{C} - \frac{4h - \alpha_1}{2\alpha_1\tau} + \frac{\alpha_1 - 2}{2\alpha_1\tau} \cdot \ln \frac{4\tau}{C} + \dots \right) \quad (2.19)$$

En la que:

$$h = 2\pi \cdot \lambda_{tierra} \cdot R_b \quad (2.20)$$

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot C_{tierra}}{C_{cyl}} \quad (2.21)$$

$$\tau = \frac{a_{tierra} \cdot t}{r_b^2} \quad (2.22)$$

$\gamma$ , 0,577215664 es la constante de Euler

## 4 – Modelo análisis numérico de diferencia finita unidimensional

Representan la geometría detallada y las propiedades térmicas del fluido de la tubería, del relleno del orificio y del terreno, así como las diversas tasas de transferencia de calor. La gran cantidad de datos hace que estos modelos sean más difíciles y requieran más tiempo en los cálculos que los modelos analíticos anteriores.

En estos modelos el flujo de agua freática da lugar a un transporte de calor convectivo que influye en el rendimiento efectivo del orificio de perforación. Varios autores han llegado a la conclusión de que, en condiciones normales de

trabajo, esta influencia es despreciable o bien que solo debe considerarse en el caso de materiales geológicos de alta conductividad (arena, gravilla) y en rocas con porosidades secundarias (facturas) pueden influir.

Por otro lado, fracturas en la roca en las zonas inferior y superior del orificio pueden dar lugar a una diferencia de presión entre el agua caliente del orificio y el agua existente en la zona del terreno de temperatura no perturbada, causando un efecto de termosifón con flujo de agua desde la fractura de la roca de la parte inferior del orificio hasta la otra fractura que pueda existir en la parte superior.

Los ensayos de respuesta térmica se iniciaron en Suecia y en Estados Unidos en 1995 y se basaron en inyectar una fuente de calor constante (resistencia eléctrica alimentada por una fuente de potencia constante) en el terreno, a través de una tubería en la U. Actualmente, la mayoría de países de Europa y América utilizan el modelo de análisis de fuente lineal continua simplificado.

A partir de la conductividad térmica del suelo puede determinarse la resistencia del pozo de acuerdo con la expresión:

Resistencia del pozo

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_c} \cdot \ln \frac{R_0}{R_1} \quad (2.23)$$

En la que:

$k_c$ ; Conductividad térmica del cemento de sello

$R_0$ ; Radio exterior del cemento (diámetro del pozo)

$R_1$ ; Radio interior efectivo (radio del tubo U.  $\sqrt{2}$ )

### 2.4.3.2 Condiciones para el ensayo de respuesta térmica.

En suelos de baja conductividad (<1,7 W/m, °C) deben esperar 5 días después de realizar la perforación e instalar el tubo en U y rellenar el espacio entre el tubo y el orificio perforado en el terreno. En suelos de alta conductividad (>1,7 W/m, °C) se recomienda esperar tres días para ejecutar el ensayo. Duración del ensayo = 36 a 48 horas Potencia calorífica = 50 a 80 W/m de la profundidad de la perforación. Esta potencia calorífica debe ser aportada por una fuente estable ( $\pm 1,5\%$  potencia media), debiendo descartarse la línea eléctrica comercial. Si esta se utilizara, los ensayos deberían de durar más tiempo, al objeto de promediar las variaciones de potencia. (Creus Sole, 2008)

Exactitud en la medida de las temperaturas de entrada y salida = 0,3°C.

El caudal necesario viene determinado por la fórmula: (Creus Sole, 2008)

$$P = p_c \cdot p_w \cdot q \cdot \Delta T_{\text{entrada-salida}} \quad (2.24)$$

Donde:

P; Potencia (kW)

$p_c$ ; Calor específico del agua (4,18 kJ/kg K)

$p_w$ ; Densidad del agua (kg/l)

$q$ ; Caudal (l/s)

El régimen de caudal de la bomba debe ser tal que propicie una temperatura diferencial de 3,5 a 7°C.

La diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del intercambiador debe estar entre 4°C a 5°C y para evitar la convección térmica en el intercambio

de calor es necesario limitar los aumentos de temperatura superiores a 30 a 35°C. (Creus Sole, 2008)

La toma de datos de temperaturas y potencia del calefactor debe efectuarse cada 10 minutos como mínimo. Se recomienda que se registren los datos en un ordenador por lo que será posible registrar los datos a intervalos más cortos, por ejemplo, cada minuto o menos. Para medir con exactitud la conductividad calorífica, el orificio de la perforación debe ser revestido de bentonita para prevenir que cualquier flujo de agua entre a través del pozo. (Creus Sole, 2008)

Asimismo, en el sistema no debe entrar ni salir calor, por lo que se recomienda que la tubería instalada sobre el terreno se aisle con fundas de un mínimo de 1,25 cm. De espesor. El ensayo se inicia conectando el calefactor con tuberías aisladas a la tubería en la U insertada en el pozo. A continuación, se hace circular el fluido de trabajo por los tubos sin calor, hasta que la temperatura se ha equilibrado, lo cual dura de 12 a 16 horas.

Se conecta el calefactor para proporcionar entre 40 y 50 W/m. (Creus Sole, 2008)

Durante el ensayo, se registran ocho parámetros cada minuto:

Temperatura de **entrada** y **salida** del fluido al intercambiador de calor.

Temperatura **exterior** e **interior** del módulo.

Presión de **entrada** y **salida** del fluido de trabajo al intercambiador de calor.

**Caudal** del fluido de trabajo.

**Consumo** de energía.

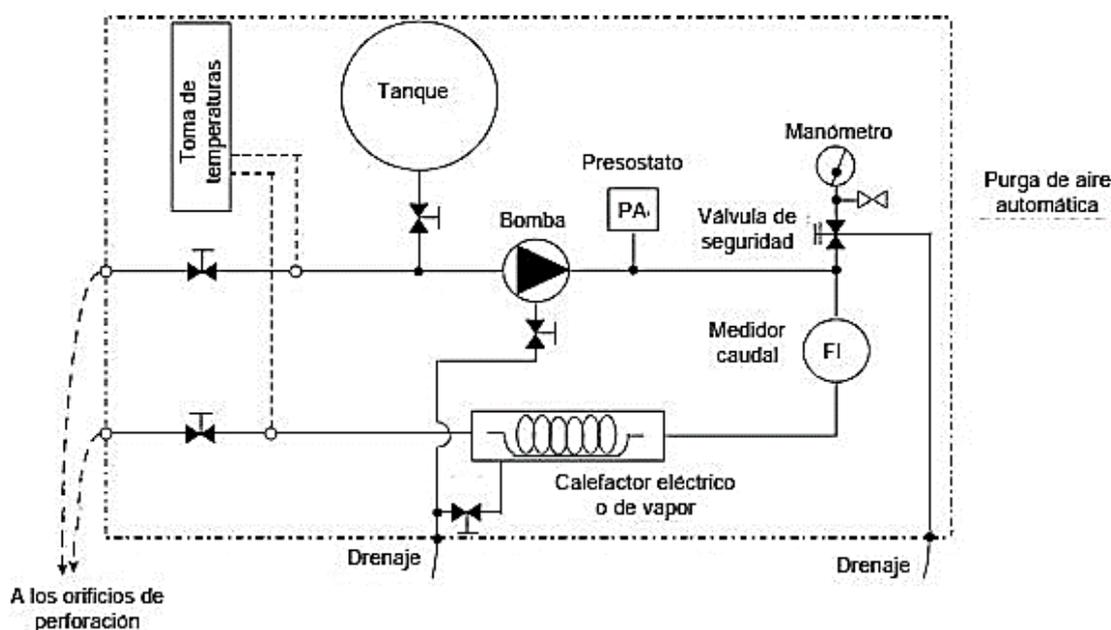
Una vez realizado en ensayo los datos registrados pueden ser analizados mediante un programa informático, lo que permitirá deducir la conductividad

térmica a varias profundidades, la conductividad media del terreno y la resistencia térmica entre el fluido de trabajo y las paredes del orificio. (Creus Sole, 2008)

#### 2.4.3.3 Equipo utilizado en el ensayo

Se realiza en el circuito cerrado con un tubo en U introducido en el orificio de perforación y montados en serie, una bomba, un medido de caudal, un calefactor y dos sondas de temperatura que miden la temperatura a la entrada y salida del caudal de fluido de trabajo. El ensayo dura 50 horas como mínimo. (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.19 Esquema de equipo de ensayo de respuesta térmica



Fuente: (Creus Sole, 2008)

#### 2.4.3.4 Muestreo de materia a varias profundidades

El análisis de la composición de las muestras proporciona una información adicional de las propiedades del terreno. El análisis se efectúa en el laboratorio o bien en el campo con un ensayo de respuesta especial. Incluso con la información obtenida puede comprobarse si los valores de  $\lambda$  han sido bien calculados.

Tabla.2.5 Datos petrofísicos en muestras de material a lo largo del orificio

Sonda	Profundidad (m)	Litología	Conductividad térmica matriz $\lambda_m$ (W/m.K)	$\Delta\lambda_m$ (W/m.K)	Densidad de la matriz $\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad efectiva $\phi_{eff}$	$\Delta\phi_{eff}$	Conductividad térmica de la muestra saturada de agua $\lambda_f$ (W/m.K)	Error de la medición $\Delta\lambda_f$ (W/m.K)
IW-1	5 - 18	Arcilla						1,69	0,05
IW-2	18 - 28	Gravilla	3,55	0,18	2,69	0,2	0,05	2,5	0,11
W-1	72 - 80	Arenisca media	2,89	0,07	2,48	0,2	0,05	2,12	0,06
W-2	104 - 106	Marga	2,19	0,09	2,34	0,2	0,04	1,7	0,02
IW-3	112 - 126	Marga/Arenisca fina	2,17	0,09	2,48	0,17	0,02	1,74	0,01
W-3	148 - 152	Arenisca fina/Marga	2,37	0,2	2,59	0,15	0,01	1,95	0,03
IW-4	150 - 160	Arenisca fina/Marga	2,64	0,07	2,53	0,12	0,02	2,23	0,02
IW-5	210 - 226	Arenisca fina/Marga	2,69	0,2	2,57	0,13	0,01	2,22	0,03
IW-6	228 - 248	Arenisca media/Marga	2,62	0,14	2,57	0,13	0,01	2,17	0,02
W-4	252 - 272	Marga/Caliza	2,2	0,07	2,55	0,16	0,01	1,79	0,01
IW-7	278 - 298	Marga	2,07	0,15	2,46	0,17	0,02	1,69	0,02

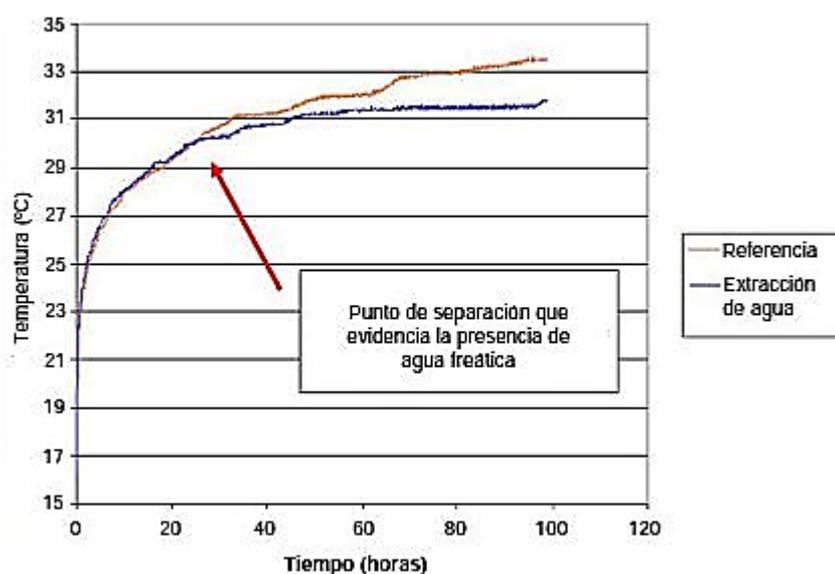
Fuente: Geowat AG

Un valor bajo en la conductividad térmica de la muestra saturada (1,69) indica arcilla, los valores intermedios señalan terreno con mezcla de caliza. Un valor alto (2,5) indica gravilla.

Si se encuentra agua puede pensarse en la posibilidad de utilizar un sistema abierto, más barato de instalación, pero más caro de mantenimiento, que además debe tener la garantía de no contaminar el terreno y cumplir con las leyes locales.

El nivel de agua freática puede ser estimado viendo el punto de separación entre la temperatura de referencia y la de la extracción de agua.

Figura N° 2.20 Nivel de agua freática



Fuente: Witte 2001

## 2.5 SISTEMA DE TUBERÍAS

La red de tuberías enterradas contiene un líquido anticongelante (propilenglicol, ...) que es impulsado por una bomba. Como la temperatura bajo el suelo es constante tiene lugar una transferencia de calor en invierno o de frío en verano que mediante la bomba de calor se transfiere a la casa o al edificio de oficinas. Las bombas pueden tener de 2kW hasta 27 kW de potencia y sus capacidades de calefacción y refrigeración pueden venir expresadas de varias formas. Generalmente la capacidad de refrigeración viene dada en kW en Europa y en Estados Unidos en tons, mientras que la capacidad de calefacción se expresa en kW o Btu/h. la conversión de estas unidades es:

$$1 \text{ ton} = 12000 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ kW} = 3412 \text{ Btu/h}$$

$$1 \text{ ton} = 3,517 \text{ kW}$$

La instalación se puede conectar a suelo radiante, sistema de radiadores o a cualquier sistema de calefacción y refrigeración cuyo fluido de transmisión sea el agua.

El sistema de tuberías o colectores puede ser de cobre recubierto de polietileno reticulado (PER), y se implanta mediante excavación o perforación, según sea el modelo seleccionado que depende del terreno disponible y de sus características.

El sistema de tuberías puede adoptar tres formas diferentes: lazo abierto, lazo cerrado e intercambio directo.

### 2.5.1 Lazo Abierto

El sistema utiliza agua subterránea de pozo a superficial (estanque) como medio directo de transmisión de calor, de tal modo que el agua fluye en una sola dirección hacia la bomba de calor y luego es descargada. (Creus Sole, 2008)

*Figura N° 2.21 Pozo único y drenaje en terreno*

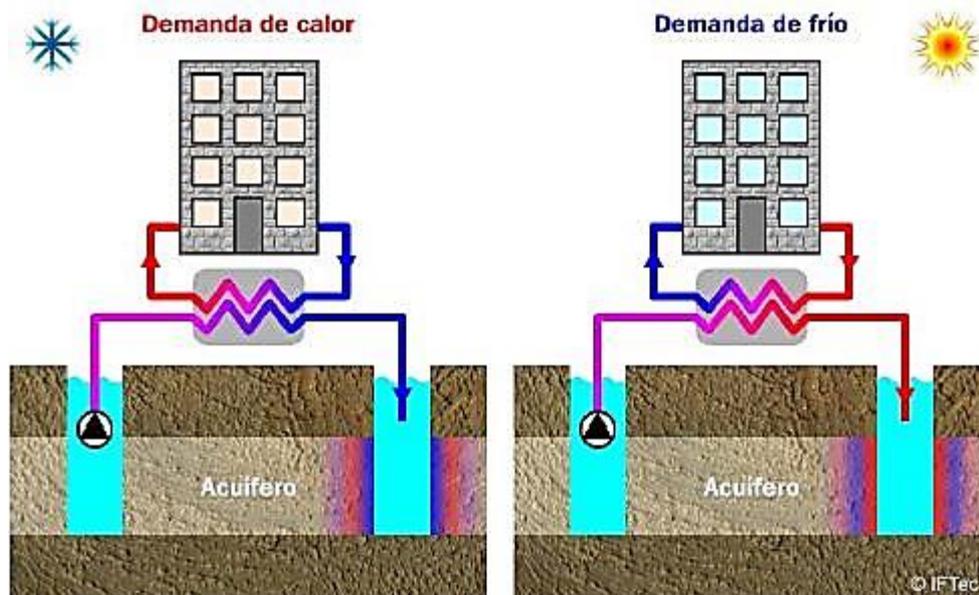


Fuente: (Creus Sole, 2008)

Los sistemas de doble pozo disponen de dos pozos separados de alimentación y de descarga de la bomba de calor y pueden ser convenientes cuando las leyes ambientales de la bomba de calor y pueden ser convenientes cuando las leyes ambientales limitan o prohíbe la descarga en acuíferos o en campos de drenaje. En resumen, se trataría de obtener agua de un acuífero confinado o abierto a una cierta temperatura y devolverla al medio más fría a una

cierta distancia de su origen, sin contaminarla en el proceso. (Rodríguez Fernández, 2012)

Figura N° 2.22 Lazo abierto de dos pozos



Fuente: (Rodríguez Fernández, 2012)

### 2.5.1.1 Calidad del agua

Si el agua contiene iones disueltos, sólidos en suspensión y microorganismos, es posible que se creen hongos y películas corrosivas, lo que incrementa la resistencia térmica a la transferencia de calor y reduce el rendimiento del sistema. Asimismo, aumenta la resistencia hidráulica al flujo y como consecuencia aumenta también el consumo de energía de la bomba. El tratamiento químico del agua cuando los caudales son elevados no suele ser económico y en todo caso, debe considerarse la elección de un intercambiador de calor intermedio que aisle el agua freática, del circuito de la bomba de calor. Esto es obligatorio si el fluido de este circuito es refrigerante, que es lo normal. (Creus Sole, 2008)

**2.5.1.2 Disponibilidad del agua**

El caudal típico necesario suele ser de 2 a 3,1 litros/minuto por kW del sistema (7 a 11 litros/minuto por ton). En grandes consumos como en escuelas u oficinas es de elección el sistema de pozo con reinyección. (Creus Sole, 2008)

**2.5.1.3 Agua de descarga**

Puede existir leyes locales que impidan o restrinjan la descarga de agua.

En la tabla pueden verse las ventajas y desventajas de los sistemas de lazo abierto. (Creus Sole, 2008)

*Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo abierto*

Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo abierto	
Ventajas	Desventajas
Proyecto simple	Leyes de descarga de agua freática o superficial pueden limitar o prohibir los sistemas de un pozo único. El caudal de agua necesario puede superar la disponibilidad local
Perforación mas barata que los sistemas verticales de lazo cerrado	Perforación más cara si se precisa de un segundo pozo de descarga de agua
Mayor rendimiento al evitar la degradación térmica asociada con la transferencia de calor	El intercambiador de calor de la alimentación puede estar sometido a corrosión, agentes abrasivos, recubrimiento de depósitos de sustancias químicas y hongos. Esto repercute en la potencia gastada por la bomba de circulación del agua, que por otra parte, requiere más potencia que en lazo cerrado
Coste de instalación más bajo si ya existe un pozo de agua doméstica o de irrigación	Coste de instalación más alto si se precisa de un segundo pozo de descarga de agua

Fuente: (Creus Sole, 2008)

**2.5.2 Lazo Cerrado**

Estos sistemas utilizan un circuito de tuberías en lazo cerrado que se acoplan al intercambiador de calor. Las tuberías contienen un fluido de trabajo que circula continuamente sin contacto alguno con el suelo o con el agua freática que puede rodear el sistema. De este modo no puede contaminar ni afectar la disponibilidad del agua freática, con lo que las leyes locales de medio ambiente no le afectan. (Rodriguez Fernandez, 2012)

Hay básicamente seis tipos de circuitos:

**Horizontal.** La red de conductos se entierra entre 60 cm y 1m de profundidad.

En este tipo de instalación la transferencia se consigue por radiación solar. Es el método más económico, pero se requiere bastante terreno libre. (Rodriguez Fernandez, 2012)

**Espiral.** Es igual a lo horizontal, pero con la diferencia de que las tuberías están arrolladas en espiral.

**Vertical.** Los conductos se entierran mediante catas que pueden variar de 5 a 60 metros de profundidad, dependiendo del espacio que se tenga, de la sequedad del terreno y de la cantidad de perforaciones que se realicen. Este sistema es el más aconsejable cuando falta espacio. (Rodriguez Fernandez, 2012)

**Sumergido.** La red está sumergida en un estanque o un lago. (Rodriguez Fernandez, 2012)

**Híbrido.** Unión de uno de los sistemas anteriores con otro de calefacción o refrigeración. (Rodriguez Fernandez, 2012)

**Sistemas directos.** Prescinden del intercambiador de calor de la bomba de calor y conectan directamente los tubos con fluido refrigerante al terreno. (Rodriguez Fernandez, 2012)

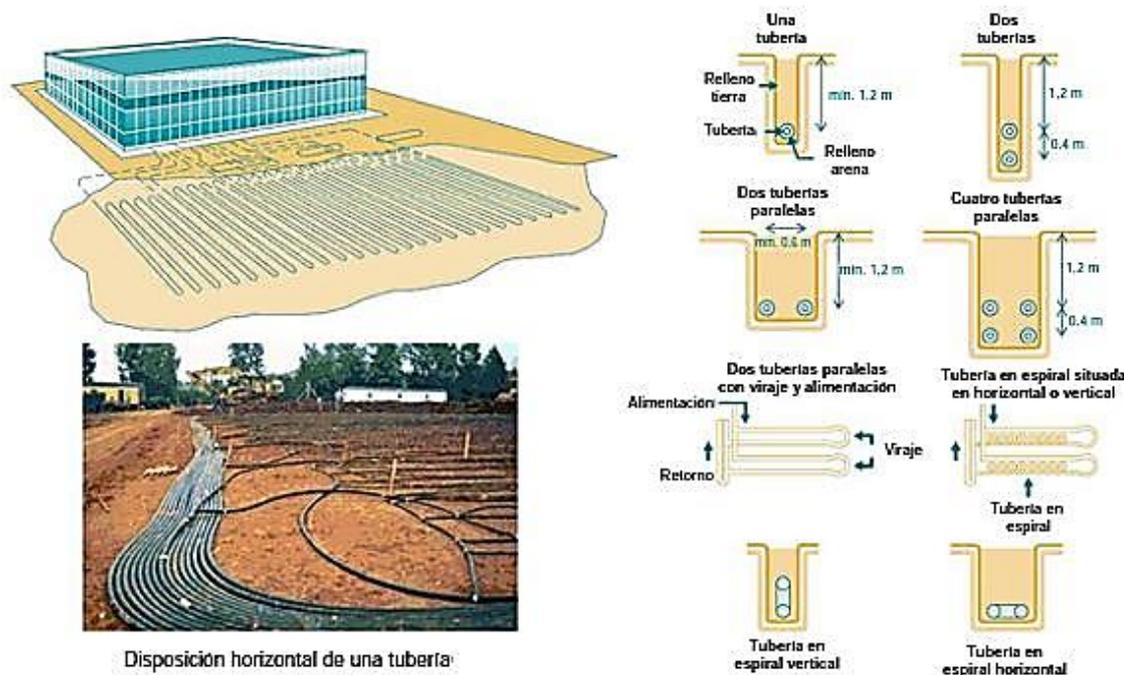
#### **2.5.2.1 Lazo cerrado horizontal**

Los lazos de tubería se disponen en trincheras paralelas a una profundidad de 1 a 3 m, cada trinchera puede disponer de 1 a 6 lazos. La longitud de las trincheras puede ser de 8,5 a 34 m por kW (30 a 120 metros por ton), dependiendo de textura y humedad del terreno y del número de lazos. La separación típica entre trinchera es de 2 a 4 m; el terreno ocupado es de unos

40 a 85  $m^2$  por kW del sistema (140 a 300  $m^2$  por ton), dependiendo de la temperatura media y de las propiedades del terreno.

El sistema es atractivo cuando existe una gran área de terreno disponible y la capa freática es elevada, de tal modo que asegura una buena transferencia de calor incluso en trincheras pequeñas. (Rodriguez Fernandez, 2012)

Figura N° 2.23 Lazo cerrado horizontal



Disposición horizontal de una tubería:

Fuente: (Creus Sole, 2008)

En la tabla pueden verse ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado horizontales.

*Tabla 2.7 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado horizontales*

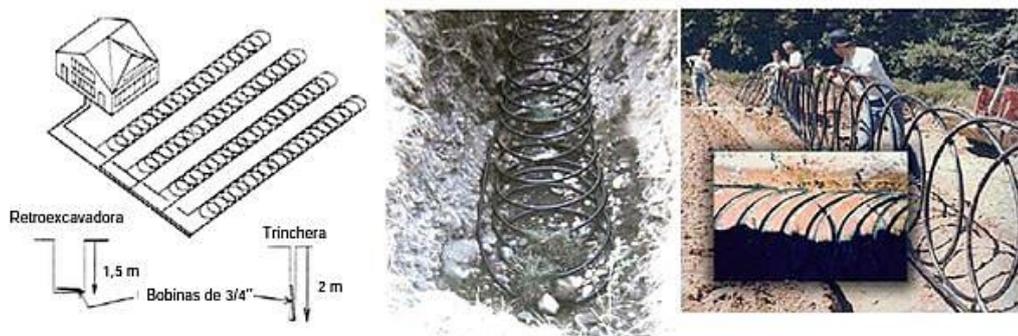
Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo cerrado horizontales	
Ventajas	Desventajas
La construcción de las trincheras es más barata que los sistemas verticales de lazo cerrado	La red de tuberías puede dañarse durante el relleno de las trincheras
Hay más contratistas con el equipo adecuado	Las longitudes de tubería son más largas por energía térmica cedida que los lazos verticales. Gran área de terreno requerida. Deben considerarse los niveles de agua al estimar la longitud de tubería requerida, especialmente en terrenos de arena y en áreas elevadas
Existen muchas opciones en la instalación en función del equipo de digging (bulldozer, backhoe o trencher) y del número de lazos de tubería por trinchera	El rendimiento depende de la estación del año, de las lluvias y de la profundidad del burial. Son necesarios líquidos anticongelantes para manejar las temperaturas del terreno en invierno

Fuente: (Creus Sole, 2008)

**2.5.2.2 Lazo cerrado en espiral**

Es una variante de lazo horizontal, consiste en una tubería enrollada en lazos circulares que se solapan y que pueden instalarse en vertical u horizontal. En la instalación vertical el lazo está en esa posición en la trinchera, que es estrecha y suficiente profundidad, para evitar que la parte superior de la bobina de tubería no esté sometida a variaciones de temperatura importantes durante las oscilaciones de las estaciones del año. En la instalación horizontal el lazo se dispone en esa posición, por lo que la trinchera será de una amplitud un poco superior a la bobina formada por la tubería, típicamente de 1 a 2 m de ancho. (Rodríguez Fernandez, 2012)

Figura N° 2.24 Lazo cerrado espiral



Fuente: (Rodriguez Fernandez, 2012)

En la tabla pueden verse las ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado en espiral

Tabla 2.8 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado en espiral

Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo cerrado en espiral	
Ventajas	Desventajas
La construcción de las trincheras requiere menos superficie de terreno y menos espacio que los sistemas de lazo cerrado horizontales.	Se gasta más energía para bombear que en los sistemas de lazo cerrado horizontales
Menor coste de instalación que los sistemas de lazo cerrado horizontales	Es más difícil el relleno de las trincheras para asegurar que no quedan espacios huecos alrededor de las bobinas de tubería, en particular, en algunos tipos de terrenos. Esto es más importante en trincheras para tuberías de bobina vertical que en trincheras de ancho más amplio para tuberías de bobina horizontal

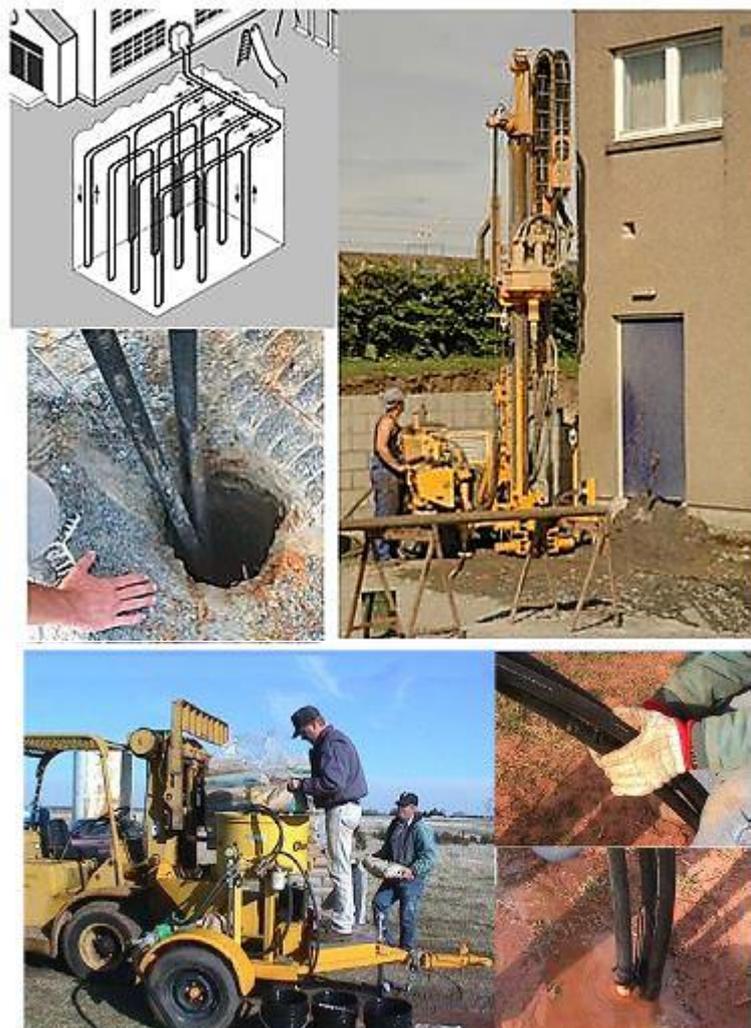
Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.5.2.3 Lazo cerrado vertical

Se considera cuando el terreno disponible es pequeño. Las perforaciones se realizan a profundidades que van desde 70 hasta 100 m y las tuberías se insertan en los orificios verticales practicados. Las necesidades de tubería abarcan de 34 a 57 m lineales por kW del sistema (120 a 200 m lineales por ton), dependiendo de las condiciones del suelo y de la temperatura. Asimismo, y para revertir la degradación a largo plazo del terreno como fuente térmica, se requieren de 3 a 6 orificios por kW de carga del sistema (uno a dos orificios por ton), estos orificios

se practican espaciados de 5 a 7 m, dependiendo del clima y de las condiciones del suelo. (Creus Sole, 2008)

*Figura N° 2.25 Lazo cerrado vertical*



Fuente: (Creus Sole, 2008)

En la tabla pueden verse las ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado en espiral.

Tabla.2.9 Ventajas y desventajas de lazo cerrado vertical

Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo cerrado vertical	
Ventajas	Desventajas
Requiere menos longitud de tubería que los restantes sistemas de lazo cerrado	Los gastos de perforación son mas altos que los de la tubería horizontal
Precisa menos extensión de terreno	El diseño de la tubería vertical es más costoso que los restantes sistemas
No le afectan las oscilaciones estacionales de temperatura del suelo	Pueden presentarse cambios a largo plazo en la temperatura del suelo si los orificios no están suficientemente espaciados

Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.5.2.4 Lazo cerrado sumergido

Estos sistemas necesitan pozos, mares ríos o lagos donde, como dice su nombre, el circuito queda sumergido a este, el intercambio se realiza con la temperatura del agua y no el subsuelo propiamente. (Torrres Cruces, 2017)

Figura N° 2.26 Lazo cerrado sumergido



Fuente: (Torrres Cruces, 2017)

En general, estos sistemas no son adecuados para ríos, ya que pueden ser afectados por las crecidas y por los arrastres de piedras, maderas o ramas de árbol.

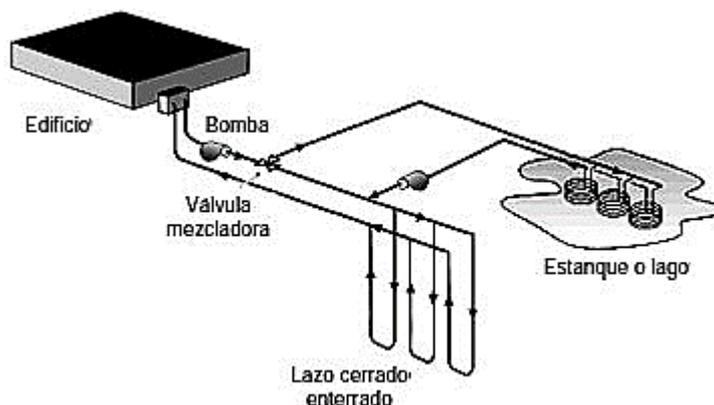
Tabla 2.10 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado sumergido

Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo cerrado sumergido	
Ventajas	Desventajas
Pueden requerir una menor longitud total de tubería si se dispone de la reserva de agua adecuada	Requieren mas regulaciones que los sistemas de lazo cerrado soterrados
Puede ser el sistema más barato de todos los sistemas de lazo cerrado si se dispone de la reserva de agua adecuada	Debe señalarse bien su posición para no ser dañados por el anclaje de barcas en el estanque o en el lago

**2.5.2.5 Lazo cerrado híbrido**

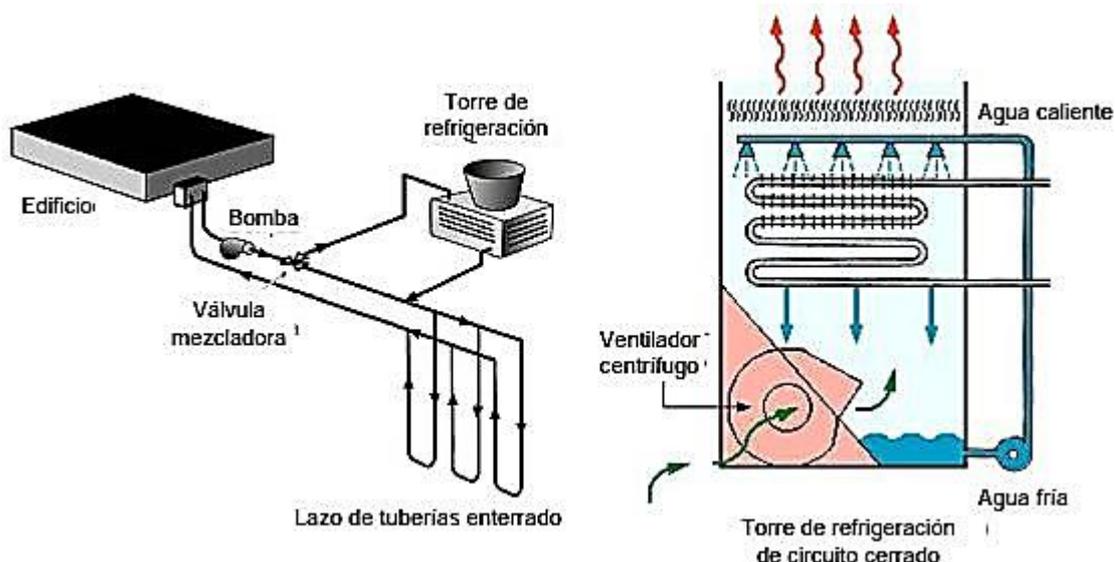
Cuando existe un desequilibrio estacional entre las necesidades de calor en invierno y las de frío en verano, en lugar de proyectar un lazo cerrado enterrado de la máxima capacidad de refrigeración para el verano, del que solo se requerirá un porcentaje de capacidad para la calefacción en verano, puede acudirse a un sistema híbrido que complemente el sistema con un lazo cerrado sumergido en un estanque o lago o mediante una torre de refrigeración. (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.27 Lazo cerrado híbrido con estanque o lago



Fuente: (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.28 Lazo cerrado híbrido con de refrigeración



Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.5.3 Sistemas directos con líquido refrigerante

Prescinden de la red de tuberías con el fluido de trabajo y del intercambiador de calor líquido/refrigerante y emplean lazos cerrados de tubo de cobre que transfieren el calor directamente entre el terreno y el fluido refrigerante, es decir, el lazo de refrigerante de la bomba de calor está enterrado en el terreno. De este modo, la temperatura del refrigerante es muy próxima a la del terreno, lo que reduce la relación de compresión de bomba de calor con un menor tamaño y una menor potencia. (Rodríguez Fernández, 2012)

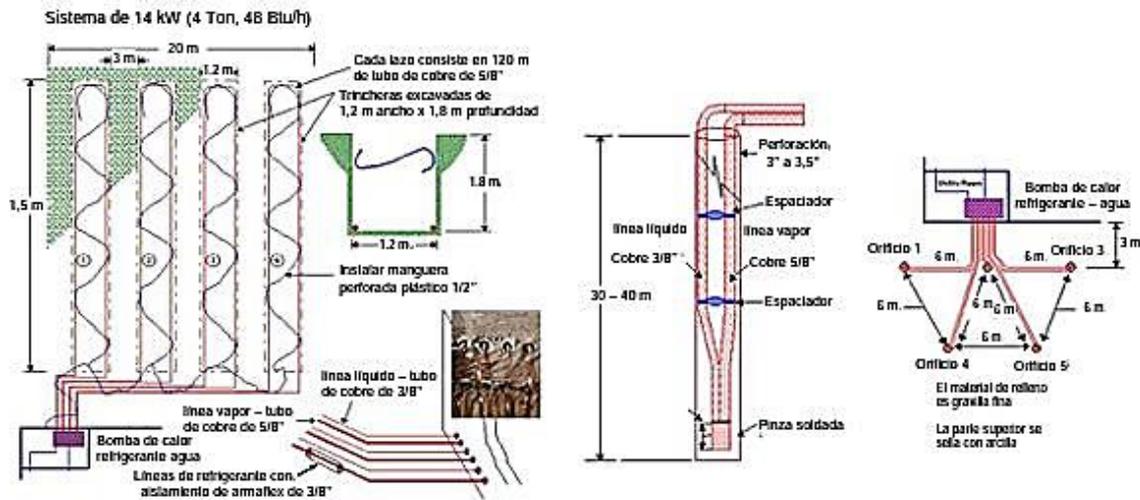
Asimismo, al ser el cobre un mejor conductor del calor que el tubo de polipropileno, el lazo cerrado tiene una menor longitud.

La red de tuberías puede instalarse en trincheras horizontales o en configuración vertical. En configuración horizontal, se requieren 30 m de tubo de cobre por kW del sistema (de 9 a 130 m menos que los tubos de polipropileno). (Rodríguez Fernández, 2012)

La configuración verticales precisan por kW solo de orificios de 3" de diámetro hasta una profundidad de 10,5 m (los tubos de polipropileno necesitan orificios

de 4" a 6" hasta una profundidad de 17 a 26 m por kW) solo necesitan unos 46 m<sup>2</sup> de terreno horizontal y emplean la misma extensión que la distribución vertical. (Rodriguez Fernandez, 2012)

Figura N° 2.29 Lazo cerrado híbrido con colector solar



Fuente: (Rodriguez Fernandez, 2012)

El calor que desprenden los lazos en el terreno puede convertir por cocción el terreno en sólidos en forma de grano fino, reduciendo su conductividad térmica y por lo tanto el rendimiento del sistema. Como en suelos ácidos, el cobre está sometido a corrosión, debe instalarse en terrenos con el pH entre 5,5 a 10. (Rodriguez Fernandez, 2012)

En la tabla pueden verse las ventajas desventajas de los sistemas directos con líquido refrigerante.

Tabla 2.11 Ventajas y desventajas de los sistemas de lazo cerrado con líquido refrigerante

Ventajas y Desventajas de los sistemas en lazo cerrado directo con líquido refrigerante	
Ventajas	Desventajas
Mayor rendimiento térmico	Posible engelamiento del terreno en contacto con el lazo de tuberías
No se requieren intercambiadores de calor	El tubo de cobre no puede enterrarse al lado de grandes árboles ya que las raíces pueden dañar el sistema
Menor área empleada en los sistemas de configuración horizontal	Las fugas en las tuberías pueden causar una pérdida catastrófica de refrigerante. Por ello, la infraestructura debe ser de calidad y debe ser instalada por personal experto lo que trae como consecuencia mayores costes de instalación

Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.5.4 Estimación de la longitud de las tuberías

Existen programas que proporcionan la longitud de las tuberías según el tipo de montaje. Estos programas utilizan los siguientes valores de arranque que son una buena aproximación inicial a la longitud de las tuberías. (Creus Sole, 2008)

Tabla 2.12 Longitud estimada de las tuberías

Longitud estimada de las tuberías			
Montaje	Longitud (m/kW)	Longitud (m/ton)	Observaciones
Horizontal de una tubería	37	130	kW (o ton) = Capacidad de refrigeración de la bomba de calor.  Ejemplo: Si la capacidad de refrigeración de la bomba de calor es de 10,55 kW (3 ton), la longitud es L = 390 m
Horizontal con 2 tuberías por trinchera	44	155,5	
Horizontal con 4 tuberías por trinchera	54	190,5	
Vertical con todas las configuraciones	35	122	

Fuente: Public Works Canada

La longitud de los orificios de perforación puede calcularse a partir de la extracción de calor específico y se expresa en W/m. los valores típicos oscilan entre 40 a 70 W/m dependiendo de la conductividad térmica del terreno, de las horas anuales de operación de la bomba de calor, del número de orificios próximos, etc. Si se conoce la capacidad de la bomba de calor, la longitud del orificio de perforación es:

$$longitud (m) = \frac{capacidad\ de\ la\ bomba\ de\ calor\ (W)}{tasa\ de\ extraccion\ especifica\ de\ calor\ (w/m)} \quad (2.25)$$

### 2.5.5 Soluciones anticongelantes

El fluido que circula por el lazo cerrado debe tener una protección antihielo cuando su temperatura baja a menos de 4°C al salir del terreno y entrar en el edificio. En efecto, como existe una diferencia de temperaturas entre las paredes de la tubería del intercambiador de calor agua-refrigerante, una temperatura interior del lazo 4°C origina una temperatura del serpentín inferior a 0°C y se forma una capa de hielo en el lado del agua del intercambiador de calor. De ese

modo, se reduce el rendimiento de la transferencia de calor y el caudal de agua se restringe o se bloquea elevando la presión y posiblemente parando la bomba. En casos extremos, el hielo formando puede destruir la tubería del intercambiador de calor, obligando a una reparación cara o a la sustitución de la bomba de calor. Existen una gran variedad de soluciones anticongelantes, que pueden verse en la tabla y en su comparación se observa que el metanol y el propilenglicol son los recomendados por este orden. (Creus Sole, 2008)

*Tabla 2.13 Comparación de soluciones anticongelantes para circuitos geotérmicos de bomba de calor*

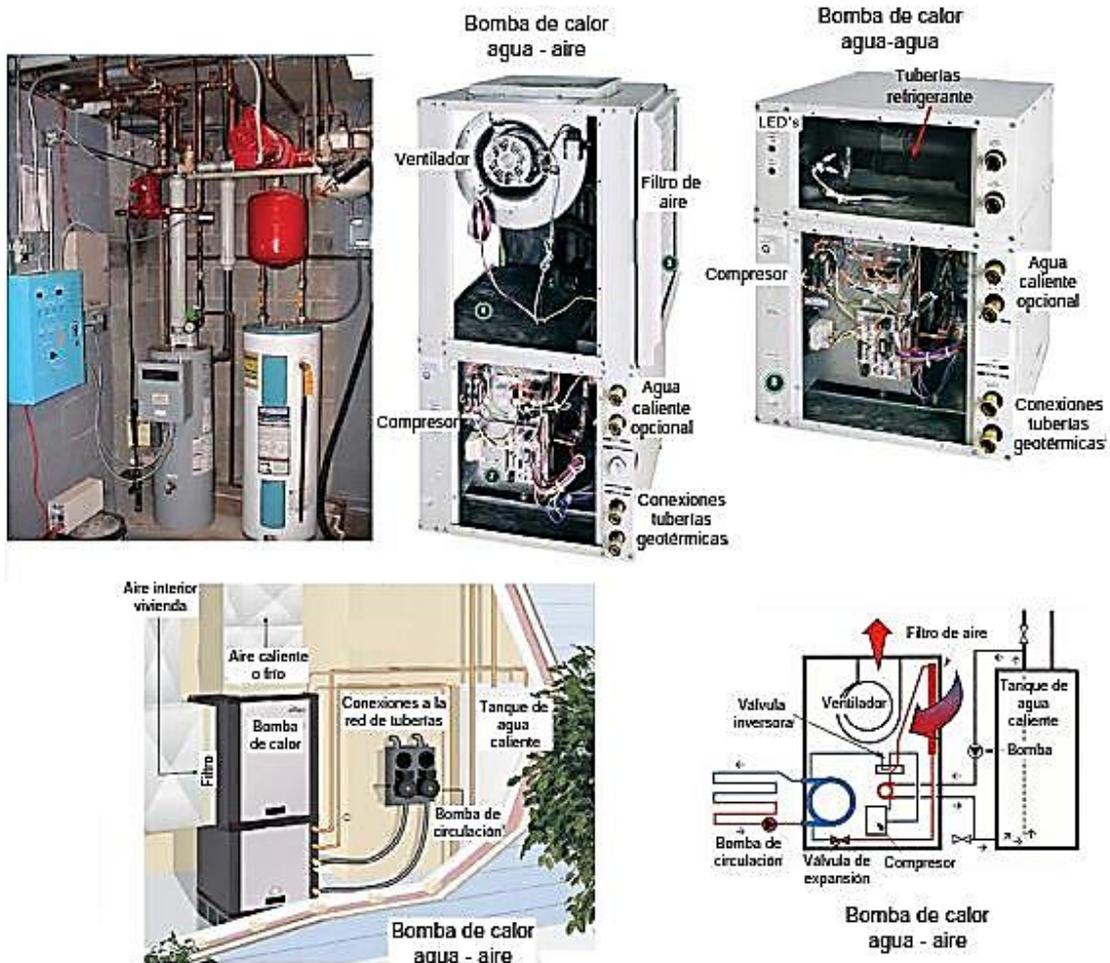
Soluciones anticongelantes					
	Ventajas		Desventajas		Observaciones
<b>Alcoholes</b>					
Metanol	Baja viscosidad - bomba de baja potencia	Alta transferencia de calor - lazos más cortos	Altamente volátil, inflamables y tóxicos	Mezclado con agua no es inflamable. No es corrosivo	Recomendado
Etanol	Baja viscosidad - bomba de baja potencia	Alta transferencia de calor - lazos más cortos	Muy volátil, inflamable. No tóxico	Mezclado con agua no es inflamable. Solo puede usarse desnaturalizado y entonces es tóxico y corrosivo del polietileno	No recomendado
<b>Glicoles</b>					
Etilenglicol	Refrigeración automóviles		Tóxico		No recomendado
Propilenglicol		Menos tóxico que el etilenglicol	Coste 10 veces más elevado que el metanol	Alta viscosidad, bajo coeficiente de transferencia de calor	Recomendado cuando no se permite el uso del metanol por regulaciones ambientales
<b>Sales</b>					
Cloruro sodico	Utilizado en la industria		Muy corrosivo	Aditivos para inhibir la corrosión y mantener el pH	No recomendado
Cloruro cálcico	Utilizado en la industria		Muy corrosivo	Aditivos para inhibir la corrosión y mantener el pH	No recomendado
Acetato de potasio	Utilizado en la industria		Baja tensión superficial	Fuga a través empaquetaduras y juntas de las tuberías	No recomendado

Fuente: (Creus Sole, 2008)

### 2.5.6 Esquema de conexiones mecánicas

En la figura puede verse un esquema de las conexiones mecánicas de las tuberías y la sala de ubicación de la bomba de calor. (Creus Sole, 2008)

Figura N° 2.30 Esquema de las conexiones mecánicas de la bomba de calor



Fuente: Climatemaster

## CAPÍTULO III.

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MÉTODO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1 Tipo de investigación

El método de investigación en cada objetivo específico es del tipo no experimental, transversal, descriptivo. La toma de datos es del tipo longitudinal, Correlacional, causal, propuesto por Hernández Sampieri en Metodología de la Investigación.

En ese sentido el presente proyecto, es una investigación de campo de tipo descriptiva, por ser flexible permite sujetarse a esquemas de razonamiento lógico, es decir permite hacer análisis sistemático del problema, con el propósito de describir, explicar sus causas y efectos, entender su naturaleza y factores constituyentes o predecir su ocurrencia. Los datos de interés son recogidos en forma directa por el propio investigador.

La investigación descriptiva es aquella que se orientan a recolectar informaciones relacionadas con el estado real de las personas, objetos, situaciones o fenómenos, tal cual como se presentaron en su momento de recolección. (Chavez, 2004).

La investigación objeto de estudio se clasificó como descriptiva, debido a que buscó especificar propiedades, características y rangos importantes del fenómeno analizado, en este caso, de la variable estudiada: gestión de mantenimiento. (Sampieri, 1991)

##### 3.1.2 Técnicas de recolección de datos

Son los documentos soporte para registrar la información recolectada. Dependiendo de la técnica empleada su usará uno u otro instrumento. Permiten

hacer un mejor análisis de la información con fines estadísticos o para tomar decisiones. (Lizarazo, 2010)

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. Dentro de cada instrumento pueden distinguirse dos aspectos: La forma: se refiere a las técnicas que utilizamos para la tarea de aproximación a la realidad (observación, entrevista, encuesta, entre otras). El contenido: queda expresado en la especificación de los datos que necesitamos conseguir. Se concreta en una serie de ítems que no son otra cosa que los indicadores que permiten medir a las variables, pero que asumen ahora la forma de preguntas, puntos a observar, elementos para registrar. (Reyes, 2005)

Cuando se ha ideado la encuesta poblacional o instrumento, se ha llegado al nivel de desarrollo del proyecto de investigación donde se deben señalar y precisar de manera clara y desde la perspectiva metodológica, cuales son aquellos métodos, instrumentos y técnicas de recolección de información considerando las particularidades y límite de cada uno de estos, más apropiados, atendiendo a las interrogantes planteadas en la investigación y a las características del hecho estudiado, que en su conjunto nos permitirá obtener y recopilar los datos que estamos buscando. (Reyes, 2005).

Los instrumentos de investigación y recolección de datos son los medios utilizados por el investigador, para medir el comportamiento o atributos de las variables. (Chavez, 2004)

Para la recolección de información se utilizarán las técnicas:

- a) Observaciones directas.
- b) Mediciones de datos.

Se observó el funcionamiento del comportamiento de los sistemas de energía geotérmica. Otra de las técnicas de recolección de información a utilizar para esta investigación es la aplicación teórica para comprobar la producción de energía eléctrica con energía geotérmica.

### **3.1.3 Técnicas de análisis de datos**

Las técnicas que se aplicarán son de dos tipos, las de campo; debido a que se requiere acumular información primaria para después analizar y cuantificarla, y las bibliográficas; para obtener información de documentos y libros referentes al tema. Además, se usará información proveniente del Internet para tener conocimiento de los últimos adelantos técnicos en este campo.

Los datos obtenidos en el proceso de investigación son analizados y mostrados en las gráficas, para la mejor visualización, comprensión y así poder elaborar las posibles conclusiones y recomendaciones.

### **3.1.4 Método de la investigación.**

La metodología utilizada para la investigación de la Evaluación del comportamiento de la energía geotérmica en la localidad de Paucarcolla, consta fundamentalmente de los siguientes pasos:

### **3.1.5 Unidades de información**

La unidad de observación, es aquella por medio de la cual se obtiene la información; es decir, es la unidad informante. “la unidad de investigación es aquella que contiene elementos que van a ser estudiados”. Para dar respuesta a la unidad de investigación y cumplir con los objetivos. (Parra, 1998)

Se recogen un conjunto de datos según un plan preestablecido que, una vez analizados e interpretados, modificarán o añadirán nuevos conocimientos a los ya existentes, iniciándose entonces un nuevo ciclo de investigación. Los

miembros de este equipo de investigación conocen lo que deben hacer durante todo el estudio, aplicando las mismas definiciones y criterios, actuando de forma idéntica ante cualquier duda. Para conseguirlo, es imprescindible escribir un protocolo de investigación donde se especifiquen todos los detalles relacionados con el estudio de la energía geotérmica en La localidad de Paucarcolla.

### **3.1.6 Temperatura de la tierra en Paucarcolla**

Para identificar la temperatura de la tierra de Paucarcolla-Puno, se realiza a través de registro de adquisición de datos con los siguientes equipos:

- PLC (Marca Schneider Electric)
- Fuente de alimentación para TM (Marca Schneider Electric)
- Módulo de expansión 4 entradas Analógicas (RTD, Termopar) Schneider Electric
- Sondas de temperatura PT-100

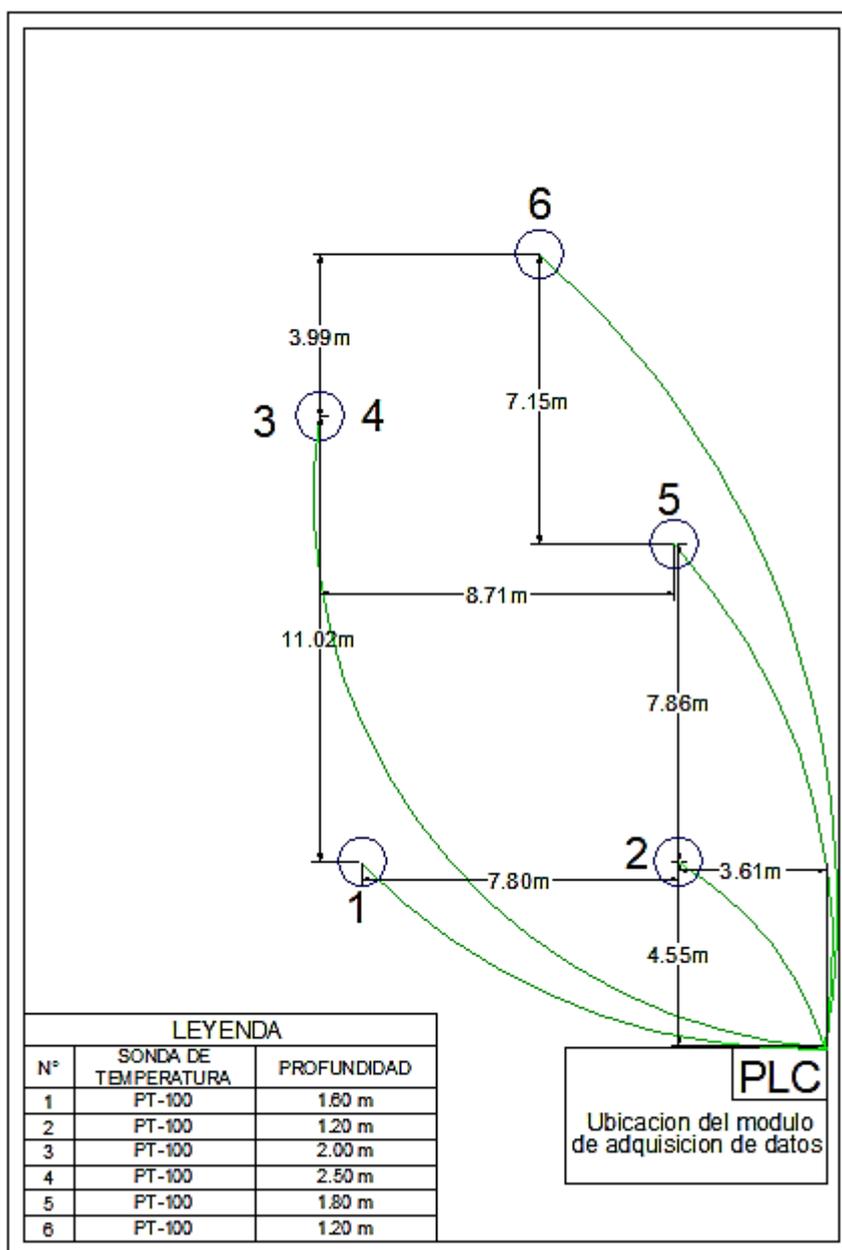
Figura N° 3.31 Equipos adquiridos



Elaboración: Propia

En primer lugar, se procedió a instalar las sondas de temperatura en distintas ubicaciones y profundidades del terreno como se muestra a continuación:

Figura N° 3.32 Esquema de instalación de sensores de temperatura

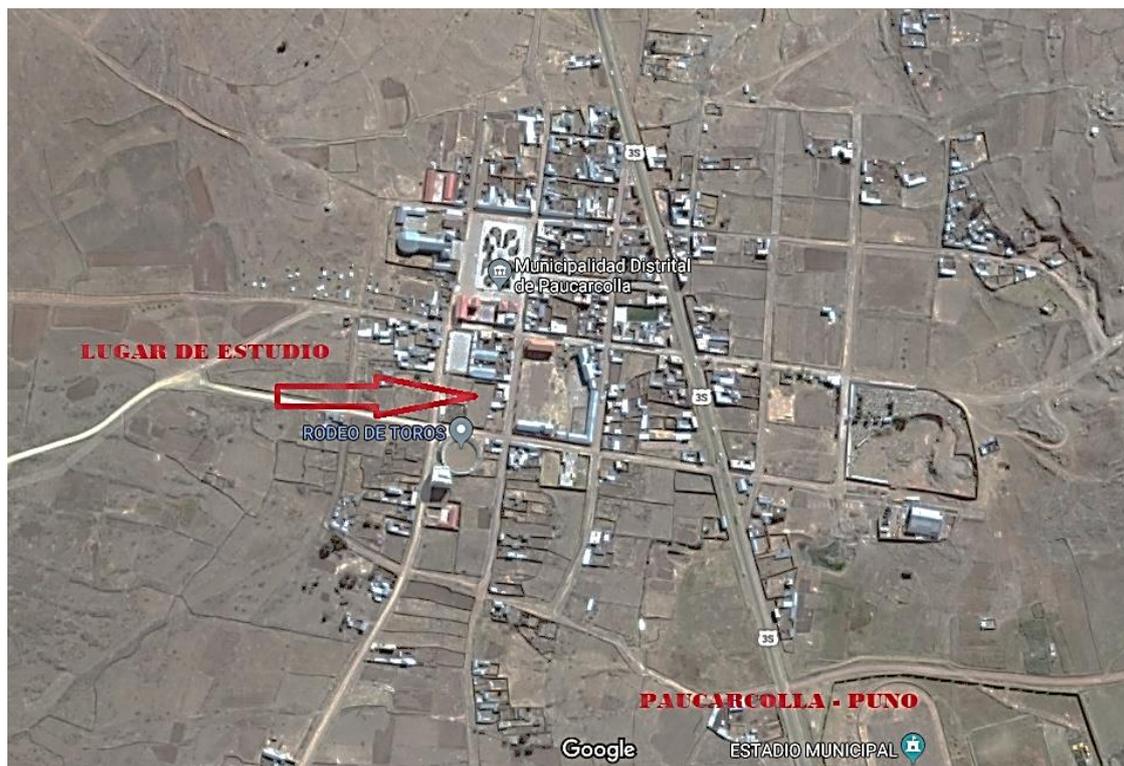


Elaboración: Propia

La mayoría de las experiencias del proyecto de investigación, y todas las expuestas en esta tesis de grado, se realizaron en el distrito de Paucarcolla, Provincia de Puno, Departamento de Puno en las coordenadas: 406880.25 E, 8351329.19 S. Cuadrante 19L. Los resultados de la investigación serán registrados en el cuadro que se refiere a continuación.

La ubicación se muestra en la figura:

Figura N° 3.33 Lugar de estudio



Elaboración: Propia

### 3.1.7 Evaluación Potencial Geotérmico en la localidad de Paucarcolla

A fin de poder realizar el objetivo planteado, se procedió con la ubicación de los lugares con presencia de energía geotermal se ubicará en el plano de coordenadas sistema WGS-84 coordenadas UTM, se procederá a registrar en los cuadros que se muestra a continuación.

Tabla 3.14 Tabla de instalación de sensores de temperatura

PROFUNDIDAD	1.20 m	1.60 m	1.80 m	2.00 m	2.5 m	Ambiente
T. MÁXIMA (°C)						
T. MÍNIMA (°C)						
T. PROMEDIO (°C)						

Elaboración: Propia

### 3.1.8 Coeficiente de rendimiento

El coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) se refiere a la razón obtenida entre el calentamiento que proporciona una bomba de calor ( $Q_{total}$ ) y la electricidad consumida para generarlo ( $W_{total}$ ), energía que en gran parte es utilizada por el compresor de la bomba (Ecuación). El COP depende directamente de la diferencia entre las temperaturas entre la fuente de calor y el área a calentar. En una bomba de calor el COP es mayor a 1, ya que, básicamente, se está utilizando energía para “mover” el calor desde un lugar (tierra) hacia otro (recinto). Por ejemplo, una bomba de calor funcionando bajo un COP teórico de 4 genera 4 unidades de calor ( $Q_{total}$ ) por cada 1 unidad de energía eléctrica suministrada. La fuente pierde, entonces, 3 unidades de calor. En términos de eficiencia y temperaturas, el COP se calcula usando la eficiencia de Carnot ( $\varepsilon_c$ ) y un factor de aproximación ( $\alpha$ ) que es un parámetro de operación de la bomba.

$$COP = \frac{Q_{total}}{W_{total}} \quad (3.26)$$

$$Q_{total} = Q_{suelo} + W_{total} \quad (3.27)$$

$$COP = \alpha \varepsilon_c \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_c = \frac{T_{hot}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (3.29)$$

La eficiencia de Carnot es función de las temperaturas absolutas de punto caliente (lugar a calentar,  $T_{hot}$ ) y punto frío (fuente de calor,  $T_{cold}$ ). La temperatura de punto caliente corresponde a la del condensador de la bomba de calor y la temperatura de punto frío es la del evaporador de la bomba de calor. Mientras menor sea esta diferencia de temperaturas, la eficiencia será mayor, tendiendo a infinito cuando el  $\Delta T^\circ$  tiende a cero

### **3.1.9 Propiedades térmicas del terreno**

#### **3.1.9.1 Conductividad, Capacidad térmica y difusividad**

La conductividad, Capacidad térmica y difusividad son propiedades características de cada material. Para los materiales usuales en el terreno existen estudios que demuestran que la conductividad térmica aumenta normalmente con el grado de humedad del mismo hasta alcanzar los valores de conductividad correspondientes a un terreno saturado, si bien no es fácil establecer la dependencia entre ambos factores con carácter general.

Algunos de los valores más usuales de acuerdo al tipo de terreno se recogen en **Anexo 3**

#### **3.1.10 Selección del sistema de climatización**

El sistema de climatización seleccionado debe ser capaz de abastecer la demanda de energía que se produce en el recinto tanto en verano como en invierno.

#### **3.1.11 diseño del intercambiador geotérmico**

En el diseño de los intercambiadores de calor enterrados intervienen múltiples factores que hacen factibles distintas variantes de diseño para un mismo sistema.

El procedimiento de diseño a seguir es el que se desarrolla en la Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica (Instituto para la diversificación y el Ahorro de la Energía, IDAE).

En este proyecto se desarrolla la metodología de diseño de la International Ground Surface Heat Pump Association (IGSHPA).

La metodología aplicada está basada en la teoría de la fuente de calor de línea infinita (Kelvin Line Source Theory) desarrollada por Ingersoll y Plass. Establece que un intercambiador de calor que cede calor al suelo se comporta como una fuente de calor con un espesor pequeño y longitud infinita, y por tanto solo cede calor en sentido radial.

Se trata de un método de cálculo que asume que el sistema funciona durante un tiempo determinado a una carga constante y con el suelo a la temperatura más desfavorable. Esto es, que se diseñará para la temperatura más desfavorable en el mes de junio para calefacción. Durante el resto del año, la temperatura es más moderada y por tanto la carga calorífica es menor, haciendo que el sistema funcione con un rendimiento mayor. Además, el suelo no estará tan frío (en invierno), lo que hará que la temperatura del agua sea más moderada y el sistema funcionará con un mayor rendimiento.

**En primer lugar**, Se selecciona la bomba de calor que satisfaga las especificaciones térmicas del recinto a acondicionar, en función de las cargas térmicas que en este caso se toma de un estudio ya realizado.

**En segundo lugar**, es importante decidir el fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado. Normalmente se trata de agua o agua con anticongelante, en el caso de previsión de riesgo de congelación.

Tras esto, es necesario escoger la configuración a emplear. Las más comunes son horizontal, vertical o Slinky, y dentro de ellas son tubos simples dobles, coaxiales, etcétera.

Una vez conocida la disposición a implantar se selecciona los tubos. Para ello se determinará el material del que están contruidos, su diámetro, y las temperaturas entre las que tiene que trabajar.

Por último, se dimensiona el intercambiador de calor enterrado en forma de sondas atendiendo a todos los criterios anteriormente determinados, finalizando con la elección del sistema, entre los fabricantes disponibles, que más se ajuste a las necesidades del proyecto.

#### **3.1.11.1      *bomba de calor geotérmica***

Las especificaciones de la bomba de calor fijan varios parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado, ya que nos determinan el calor intercambiado con el suelo y el caudal circulante por el intercambiador de calor, además de fijar el rendimiento del sistema (Coefficient of Performance COP) de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura. **Anexo 4**

#### **3.1.11.2      *Selección de bomba de calor***

Los datos de partida para la selección de la bomba de calor geotérmica son las cargas térmicas de calefacción que se toma de un estudio ya realizado de acuerdo a las exigencias de diseño Anexo 1, y. La potencia teórica de la bomba para cubrir la climatización vendrá dada por la mayor de las demandas, dado que la potencia instalada deberá cubrir las necesidades. Por tanto, ésta vendrá dada por la previsión de demanda.

Se desea encontrar una bomba de calor agua-agua que pueda trabajar en modo calefacción.

#### **3.1.11.3      *Rendimiento de la bomba de calor***

El rendimiento de la bomba geotérmica se define como lo que se quiere obtener dividido entre lo que se tiene que entregar a cambio para conseguirlo. De este modo, se definen los siguientes parámetros de operación que caracterizan a las mismas; el primero es el coeficiente de operación o

rendimiento (COP) que caracteriza a la bomba cuando trabaja en modo de calentamiento. En este caso interesa cuánto calor se transmite al local en relación al trabajo que eso cuesta:

$$COP = \frac{Q}{W} = T_c / (T_c - T_F) \quad (3.30)$$

Como se puede observar, el rendimiento de la máquina sube cuanto más pequeño sea  $(T_c - T_e)$ , es decir, cuanto más alta sea la temperatura del terreno y cuanto más baja sea la temperatura que se quiere mantener en el ambiente a calentar. El COP de una bomba de calor es mayor que la unidad.

En nuestro caso:

$$COP = Q / W \quad (3.31)$$

#### **3.1.11.4 Elección del fluido circulante**

El fluido circulante por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante, si se prevé en diseño que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación (elevado funcionamiento en calefacción, temperaturas frías de terreno, etc.). La elección del fluido dependerá de distintos factores:

- Características de transferencia de calor (conductividad térmica y viscosidad)
- Punto de congelación
- Requerimientos de presión y caídas de presión por rozamiento
- Corrosividad, toxicidad e inflamabilidad
- Coste

El cual se elige del **Anexo 5**

### **3.1.11.5 Elección de la configuración**

Se ha decidido intercambiar calor con el suelo mediante una configuración de tubos en horizontal tipo skinly se ha optado por esta opción debido a el terreno a perforar es rocosa, y con ello muy costosa

Para configuraciones de tipo horizontal es necesario determinar la profundidad de la perforación y el área del terreno. Respecto a la profundidad de las perforaciones es necesario realizar un análisis más detallado en función de los materiales de los tubos y otras características relevantes.

### **3.1.11.6 Elección de los tubos**

Se selecciona el polietileno (PE) es el material más común en los intercambiadores de calor enterrados. Son flexibles a la vez que resistentes y pueden unirse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. **Anexo 6**

#### **Elección de diámetro de la tubería**

Para la selección del diámetro de las tuberías se llega a un compromiso entre la caída de presión y el funcionamiento térmico, ya que éste:

Debe ser lo suficientemente grande para producir una pérdida de carga pequeña y así necesitar menor potencia de bombeo.

- Debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades y así garantizar turbulencia del fluido dentro del tubo, de manera que se favorezca el traspaso térmico entre el fluido que circula y la pared interior. Cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico. La condición que asegura la turbulencia es:

$$Re = 4 \cdot Q / \pi \cdot \vartheta \cdot D > 2300 \quad (3.32)$$

Donde:

$Q$ : Es el caudal en  $m^3/s$

$\nu$ : Es la viscosidad cinemática en  $m^2/s$

$D$ : Es el diámetro de los tubos a determinar

Se ha de buscar entre los fabricantes unos tubos que cumplan con las especificaciones.

### 3.1.11.7 **dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado**

El intercambio de calor se ha fijado por la diferencia de temperaturas entre el suelo y el fluido que circule por el intercambiador, por lo tanto, para dimensionar el intercambiador de calor enterrado en primer lugar hay que determinar estas temperaturas.

#### **Temperaturas máximas y mínimas de la tierra**

A partir de las ecuaciones siguientes es posible determinar la temperatura máxima (TH) y mínima (TL) que ocurren durante el ciclo anual para cualquier profundidad (Xs).

$$TL = TM - A_s * e^{(-X_s * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}})} \quad (3.33)$$

$$TH = TM + A_s * e^{(-X_s * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}})} \quad (3.34)$$

Donde

$A_s$ ; Es la oscilación de la temperatura superficial y se puede asumir nulo

$TM$ ; Temperatura media de la tierra, que se puede asumir como la temperatura seca media

$TL$ ; Temperatura mínima de la tierra

$TH$ ; Temperatura máxima de la tierra

$X_s$ ; Profundidad

Pero en nuestro caso se obtuvo de las mediciones realizadas anteriormente.

### **Temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor**

Un parámetro clave que tiene que elegir el diseñador del sistema es la temperatura del fluido que circule por el intercambiador de calor enterrado. Debe encontrarse el compromiso óptimo entre dos consideraciones:

- 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 intercambiador enterrado para el mismo intercambio de calor, por lo que los costes de inversión serán menores.
- 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.

Con esas premisas y las curvas de temperatura de la bomba de calor, el diseñador fijará sus temperaturas máximas y mínimas de trabajo (TMAX, TMIN).

Las temperaturas máximas y mínimas de la entrada del fluido se encuentran en la característica técnica de la bomba de calor se toma de la bomba ya seleccionada anteriormente.

### **Diferencia de temperaturas entre el circuito y el suelo**

Se calcula la diferencia de temperatura entre el mínimo de la temperatura de la tierra (TL) y la temperatura mínima del agua de la bomba de calor (TMIN) para los ciclos de calefacción.

Para los ciclos de calefacción, se calcula como:

$$TL - TMIN \quad (3.35)$$

### **Resistencia de los tubos al flujo de calor**

Se calcula este parámetro a través de la siguiente expresión:

$$R_p = \frac{1}{2\pi K_p} * \ln \left( \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) \quad (3.36)$$

Donde:

*Dext*; Es el diámetro exterior de los tubos

*Dint*; Es el diámetro interior de los tubos

*Kp*; Es la conductividad térmica del material de los tubos.  $W / m \cdot K$

### **Resistencia de la tierra**

La resistencia de la tierra ( $R_s$ ) es la inversa de la conductividad térmica del terreno. Conociendo la composición del terreno de la zona se puede determinar su conductividad térmica.

### **Factor de utilización (fracciones de calefacción)**

En el diseño de una instalación de bomba de calor geotérmica hay que tener en cuenta tanto la potencia pico como la demanda energética a proporcionar; podemos distinguir entre los siguientes conceptos:

- Cargas de diseño: son usadas para dimensionar y seleccionar la bomba de calor. Las cargas de diseño están basadas en estándares o condiciones aceptadas para una localización dada en el día más desfavorable de funcionamiento.
- Demanda de energía: determina la energía necesaria que debe proporcionar el sistema al edificio durante un periodo determinado (diario, mensual, anual, etc.).
- Demanda del terreno: representa el calor captado por la tierra (en modo calefacción) o disipado por la tierra (en modo refrigeración).

### **Procedimientos de cálculo de las cargas de diseño**

El procedimiento de cálculo de cargas para dimensionar un sistema de climatización es perfectamente conocido por los diseñadores y existen varios

métodos para ello. Fijando las condiciones interiores y exteriores, hay que determinar el calor que debe aportar el sistema de calefacción para suplir la pérdida de calor del edificio en invierno y calcular la ganancia de calor del edificio en verano que deberá evacuarse mediante el sistema de refrigeración para mantener una temperatura confortable. Sólo se precisa realizar estos cálculos en los meses de enero y julio, ya que son los meses con las condiciones críticas para calefacción y refrigeración.

### **Cálculo de la energía. Cálculo del factor de utilización**

Además de la potencia de la bomba de calor, en el diseño de los sistemas geotérmicos es imprescindible conocer la demanda energética del edificio, ya que únicamente cuando la bomba de calor esté en funcionamiento el intercambiador de calor cederá o absorberá calor. Debido a que la bomba de calor se dimensiona para las condiciones de funcionamiento más desfavorables, cuando la carga térmica del edificio sea inferior a la potencia de la bomba de calor, ésta funcionará intermitentemente. Este aspecto afecta a la resistencia térmica del suelo, ya que para el cálculo de la  **$R_s$**  se tiene que saber la cantidad total de calor que llega a inyectarse o extraerse durante toda una estación. Para considerar este efecto se debe determinar, tanto en calefacción como en refrigeración, la fracción de tiempo que está en marcha la bomba de calor, que se multiplicará por la resistencia térmica del suelo, a esta fracción se le llama factor de utilización (**F**) y es el cociente entre la demanda térmica del edificio durante una estación (calefacción o refrigeración) dividido por la potencia de la bomba de calor. **Anexo.7**

### Longitud del intercambiador enterrado

Una vez calculados todos los parámetros se procede al cálculo de la longitud del intercambiador enterrado para los modos calefacción y refrigeración respectivamente.

Para invierno, la longitud del intercambiador viene definida por la siguiente expresión:

$$L_{calefaccion} = \frac{Q_{calefaccion} * \frac{COP - 1}{COP} * (Rp + Rs * f_{calefaccion})}{TL - TMIN} \quad (3.37)$$

Donde:

$Q_{calefaccion}$ ; Potencia térmica de calefacción

$COP$ ; Coeficiente de rendimiento de la bomba

$Rp$ ; Resistividad del tubo

$Rs$ ; Resistividad de la tierra

$f_{calefaccion}$ ; Factor de utilización de calefacción

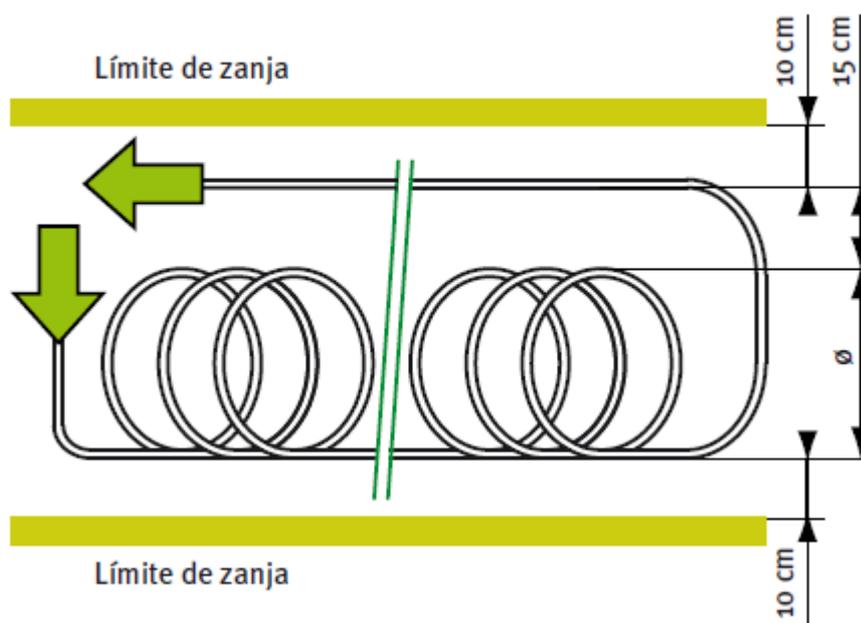
$T L$ ; Temperatura mínima de la tierra

$T MIN$ ; Temperatura mínima del agua

#### 3.1.11.8 Área del terreno para el intercambiador enterrado

Esta configuración se emplea cuando hay restricciones de espacio, ejecutándose una zanja muy estrecha (aprox. 15 cm) y profunda (más de 2 m), normalmente mediante una zanjadora de cadenas, en la que se coloca el intercambiador slinky verticalmente

Figura N° 3.34 Esquema Intercambiador Slinky (espiras superpuestas)



Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

### 3.1.12 Modelación térmica del suelo alrededor del tubo colector enterrado

Software COMSOL multiphysics versión 5.3 Este es un software comercial de análisis y resolución de elementos finitos para variados fenómenos físicos y de ingeniería. Dado que este problema es de transferencia de calor conductivo, solo se usa el módulo de “transferencia de calor”.

(<http://www.comsol.com/>)

### 3.1.13 Implicancias y obstáculos del proyecto

Para evaluar las implicancias y obstáculos que tendría el presente proyecto se recurre a la información obtenida mediante la experiencia en la implementación de otros proyectos similares u otras investigaciones realizadas.

### 3.1.14 . Recolección de Información Para la Investigación

La información necesaria para el trabajo de Investigación se recopiló en bibliotecas especializadas, Internet, consulta a ingenieros especialistas

instituciones, universidades y centros de investigación a nivel nacional e internacional que puedan contribuir al desarrollo óptimo del proyecto de Tesis.

### **3.1.15 Procesamiento de Datos**

Teniendo en cuenta que se tendrán varios parámetros de diseño, su procesamiento implicará un análisis multivariado, que nos permitirá analizar las relaciones entre variables independientes y dependientes.

### **3.1.16 Variables**

#### **Independientes:**

Evaluación de la temperatura de la fuente geotérmica de baja temperatura y la resistividad térmica de la tierra.

#### **Dependientes:**

Longitud de colector enterrado y el área del terreno.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se interpreta y analizan los datos obtenidos a partir de fuentes de información que se mencionaron en el capítulo anterior, de tal forma de extraer significados relevantes con relación al problema de investigación y dar respuestas a los objetivos planteados, en relación a las dimensiones en las cuales se descompone la variable operacional potencial geotérmico de baja temperatura en la localidad de Paucarcolla y la evaluación de las fuentes geotérmicas importantes.

#### 4.1 TEMPERATURA DE LA TIERRA EN PAUCARCOLLA

El resultado del diagnóstico y la evaluación de las temperaturas de la tierra a diferentes profundidades y el mes de mayo a julio donde es la época más fría del año y que se requiere más la calefacción.

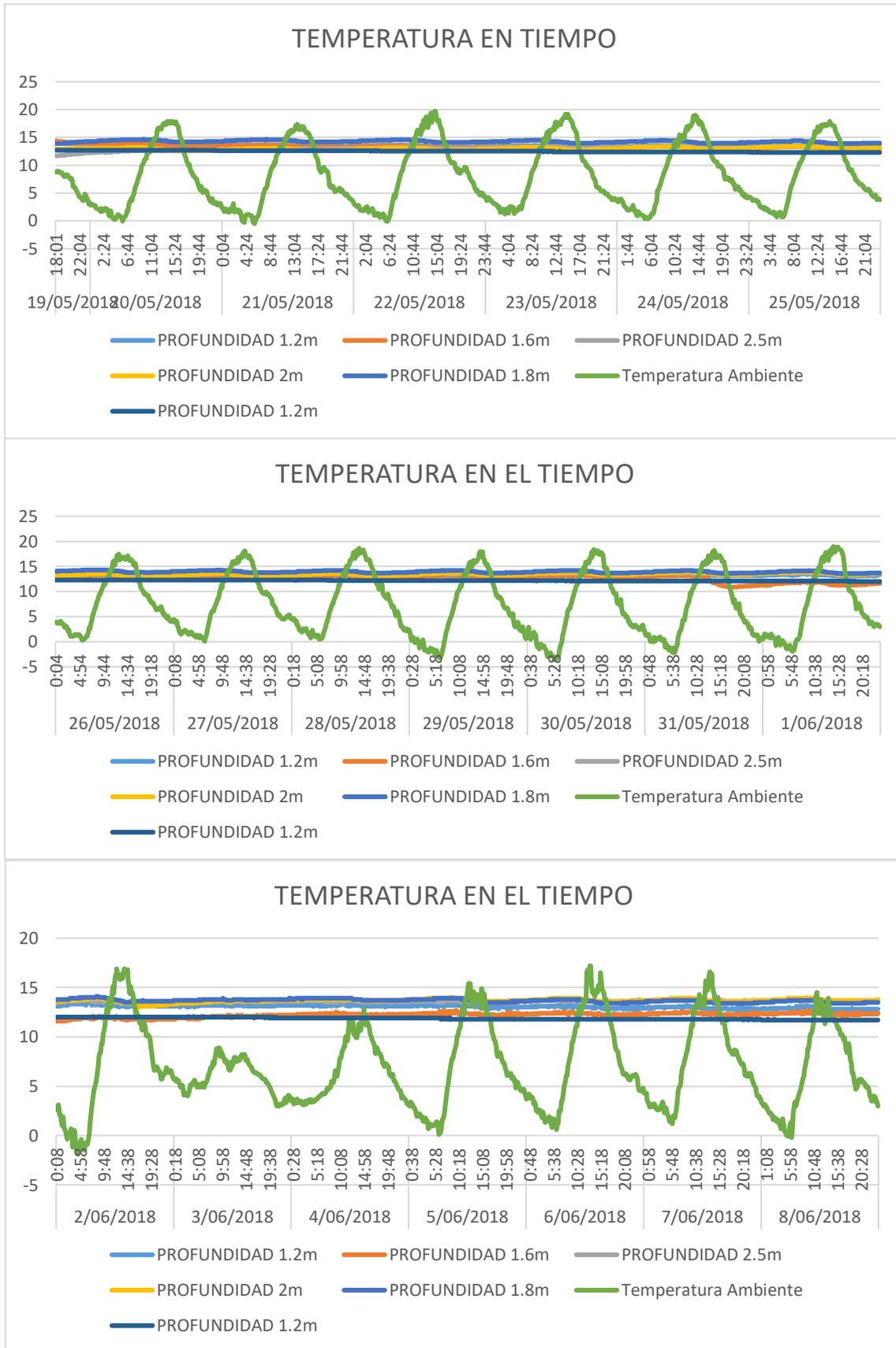
*Tabla 4.15 Temperatura a distintas profundidades en la localidad de Paucarcolla*

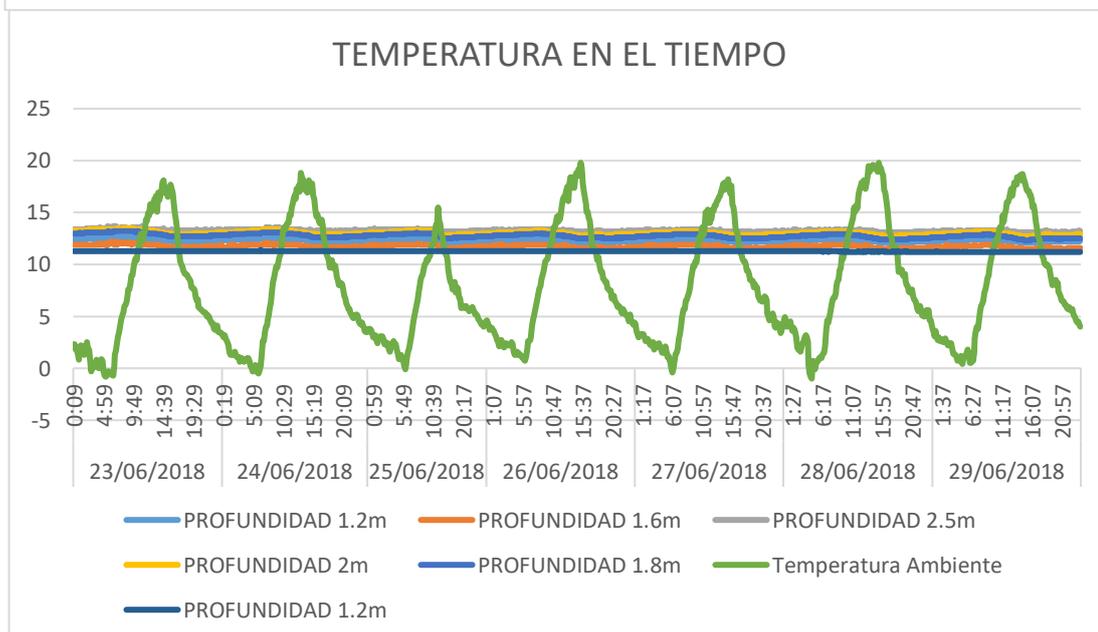
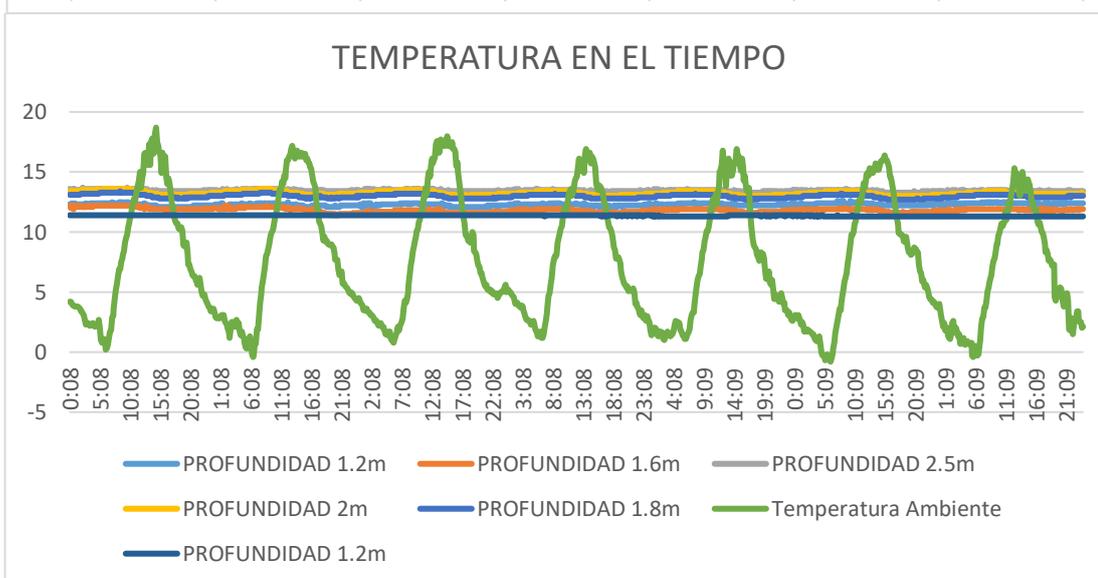
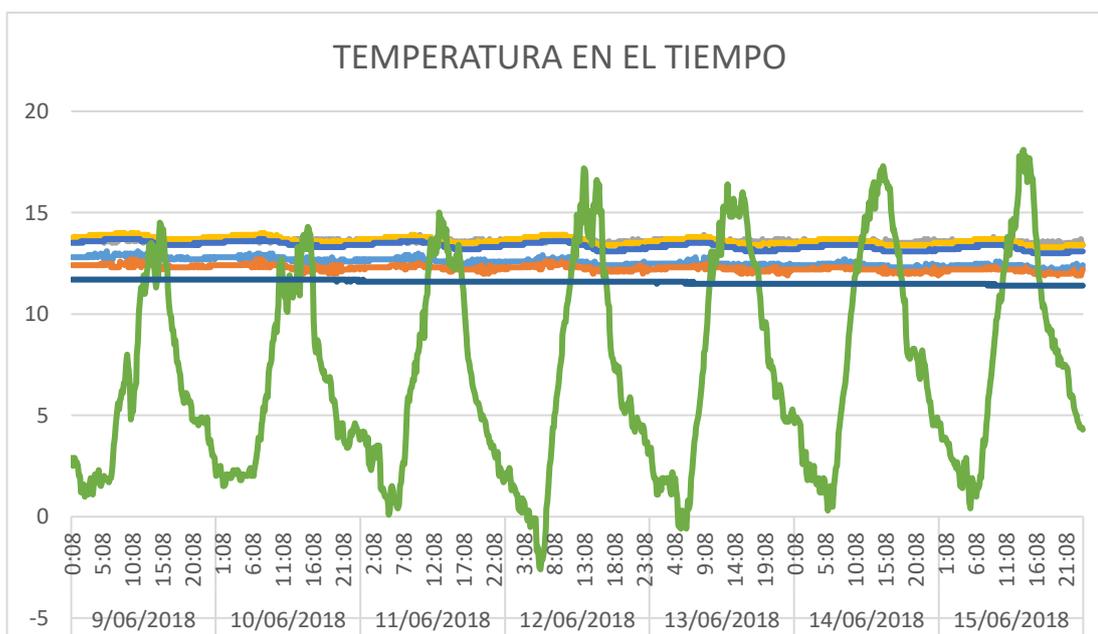
PROFUNDIDAD	1.20 m	1.60 m	1.80 m	2.00 m	2.5 m	Ambiente
T. MÁXIMA (°C)	14.10	14.40	14.70	14.00	14.00	19.70
T. MÍNIMA (°C)	11.30	10.90	11.70	12.60	11.70	-3.60
T. PROMEDIO (°C)	12.91	12.44	13.45	13.41	13.45	7.33

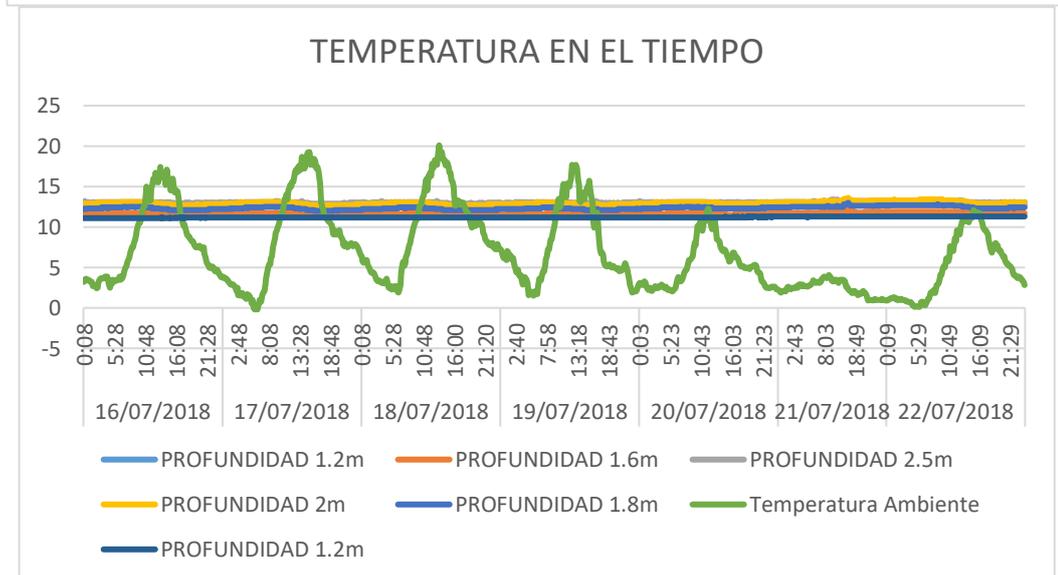
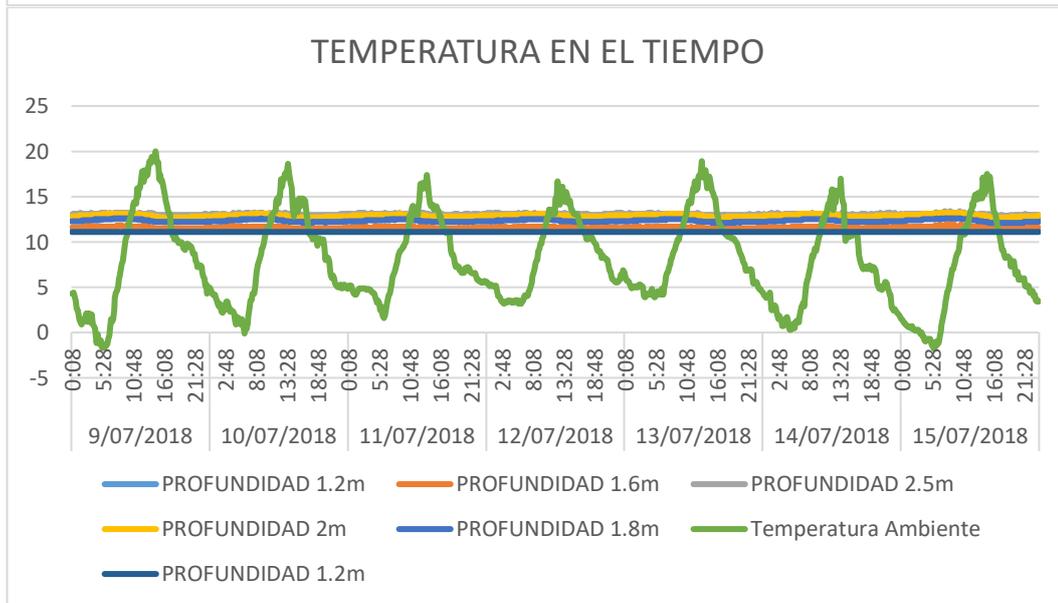
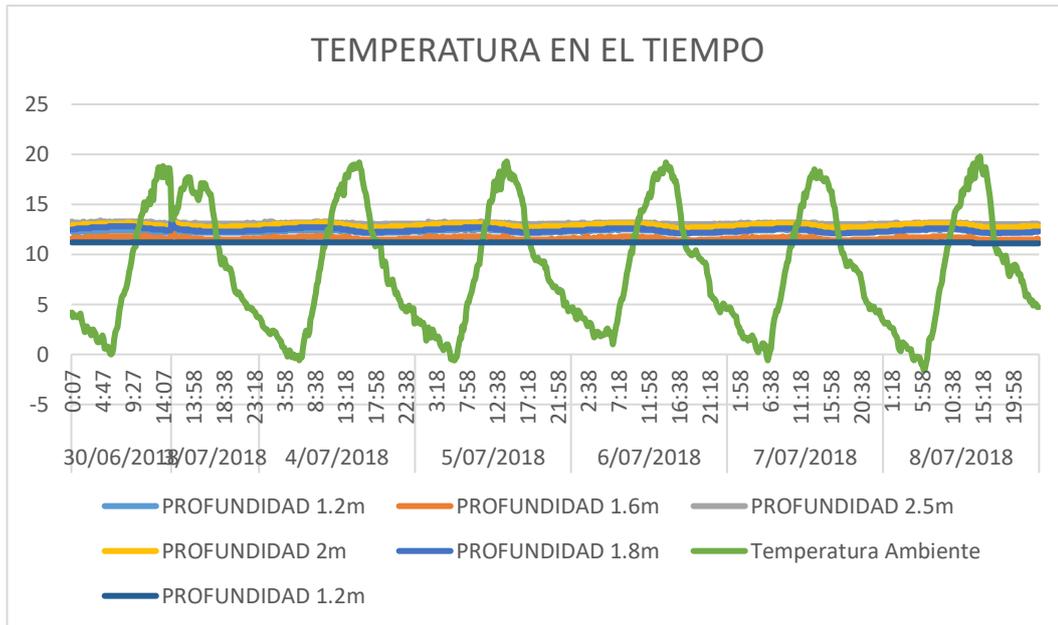
Elaboración: Propia

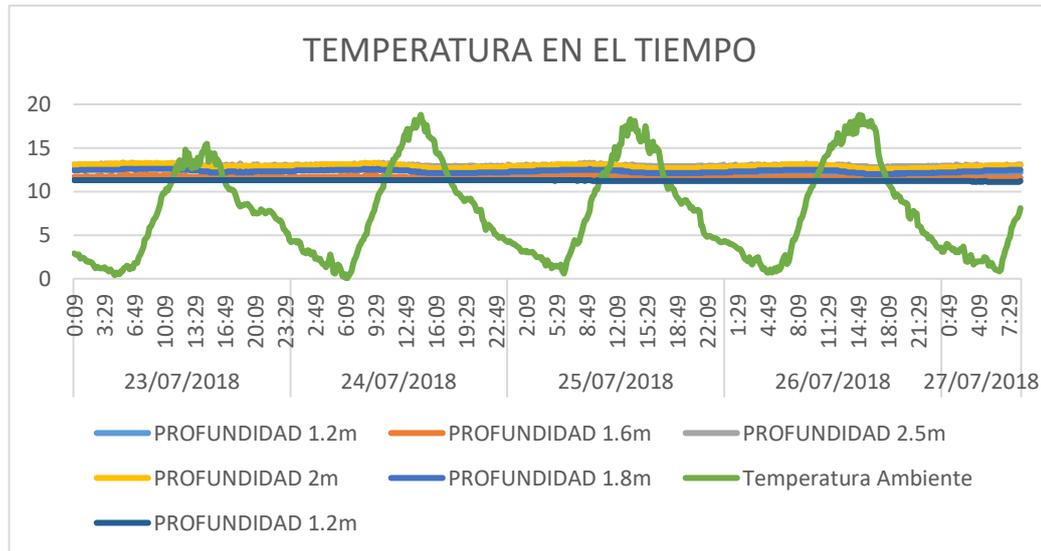
En la figura se observa las fluctuaciones diarias de la temperatura ambiente y a distintas profundidades adquiridas con los equipos instalados.

Figura N° 4.35 Comportamiento de las temperaturas a distintas profundidades con respecto al tiempo.







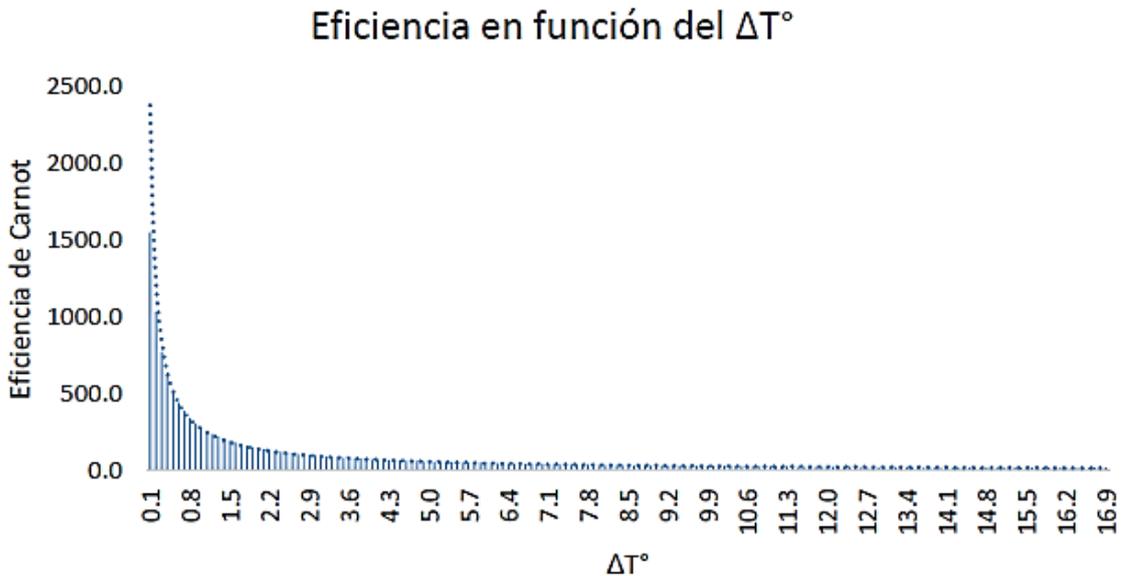


Elaboración: Propia

#### 4.2 ESTIMACIÓN DEL COP

Con soluciones existentes en el mercado que operan bajo un COP de 5, siendo este el valor más comúnmente obtenido al sopesar las variables de temperatura y eficiencia.

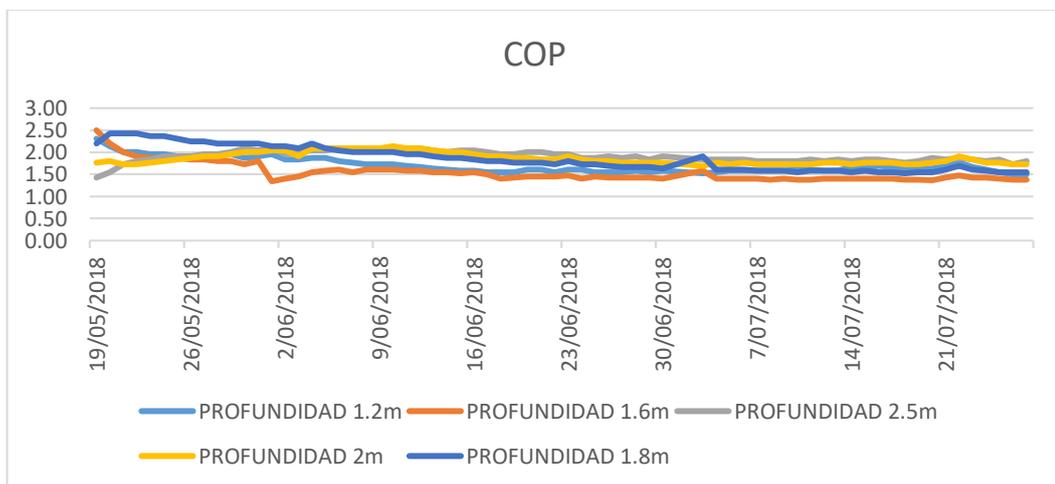
Figura N° 4.36 Variación de la eficiencia de Carnot en función de la diferencia de las temperaturas entre la entrada y la salida del evaporador.



Elaboración: Propia

En la Figura se observan el COP a distintas profundidades. El factor de aproximación ( $\alpha$ ) fue establecido en 0.5, como lo sugieren De Swardt & Meyer (2001).

Figura N° 4.37 Comportamiento del coeficiente de rendimiento



Elaboración: Propia

### 4.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

#### 4.3.1 Diseño de intercambiador geotérmico

Se seleccionó la bomba de calor con la carga térmica del recinto y seleccionó la bomba geotérmica de calor con las siguientes características:

*Tabla 4.16 Características técnicas de la bomba de calor elegida*

Características técnicas de la bomba de calor geotérmica		
Aplicación	Calefacción	Si
Refrigerante	Tipo	R410A
Eficiencia	Potencia calorífica	3-15 KW
	Consumo eléctrico	0.7 - 3.2 KW
	COP	4.5 – 5
Circuito de captación	Temperatura máxima	60 °C
	Temperatura mínima	-10 °C
	Caudal nominal	1200-4500 l/h
	Anticongelante recomendado	Propilenglicol/agua -17+/-2 °C

Elaboración: Propia

Fluido de circulación elegido con las siguientes propiedades:

Tabla 4.17 Propiedades del Fluido Elegido

Propiedades	Agua	Propilenglicol
Densidad a 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	1	0,8630
Punto congelación °C (30%volumen)	0	-12
Punto ebullición °C	100	187
Calor específico a 15 °C (kJ/kg·K)	4,187	2,50371
Viscosidad a 0°C (Pa·s)·10 <sup>-3</sup>	1,79	243
Viscosidad a 20°C (Pa·s)·10 <sup>-3</sup>	1,01	60,5
Viscosidad a 40°C (Pa·s)·10 <sup>-3</sup>	0,655	18,0
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m·K)·10 <sup>-3</sup>	0,60	0,20

Elaboración: Propia

#### 4.3.1.1 Configuración del intercambiador de calor

Se elige la configuración horizontal ya que es muy costosa la perforación para la **configuración vertical**.

#### 4.3.1.2 Elección de tubería colectora

Se eligió los tubos con las siguientes características:

Tabla 4.18 Especificaciones de la tubería elegida

TUBO DE POLIETILENO	
Diámetro exterior	32mm
Diámetro interior	26.2mm
Espesor	2.9mm

Elaboración: Propia

Con estas características se comprueba que cumple con las condiciones:

$Q$ : es el caudal en  $m^3/s$  que circula por los tubos

$\vartheta$ : es la viscosidad cinemática en  $m^2/s$ , es el resultado de dividir la viscosidad

dinámica (Pa·s) entre la densidad en  $kg/m^3$ . Su valor, calculado a partir de las

propiedades del fluido circulante, es  $2.257 * 10^{-5} m^2/s$ .

$D$  es el diámetro de los tubos a determinar

$$Re = 4 \cdot Q / \pi \cdot \vartheta \cdot D > 2300 \quad (4.38)$$

$$Re = \frac{(4 * 1.25 * 10^{-3} m^3) / S}{0.026m * \pi * 2.257 * 10^{-5} m^2/s} = 2641.95 > 2300 \quad (4.39)$$

### **Temperaturas máximas y mínimas de la tierra**

El dato se obtiene de las mediciones a una profundidad de 2 metros:

*Tabla 4.19 Temperatura máxima y mínimas de la tierra*

Temperatura máxima (TH)	14.00 °C
Temperatura mínima (TL)	12.60 °C
Promedio	13.41 °C

Elaboración: Propia

#### **4.3.1.3 Temperatura mínima de la entrada del fluido a la bomba de calor**

Las temperaturas de salida en modo calor, es la siguiente

$$T_{MIN} = 11.08 \text{ °C} \quad (4.40)$$

#### **4.3.1.4 Diferencia de temperaturas entre el circuito y el suelo**

para el sistema de calefacción tenemos el siguiente resultado:

$$TL - T_{MIN} = 2.41 \text{ °C} \quad (4.41)$$

#### 4.3.1.5 Resistencia de los tubos al flujo del calor

Con las características del tubo tenemos el siguiente resultado:

$$R_p = \frac{1}{2\pi K_p} * \ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right) \quad (4.42)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi(0.43W/m.K)} * \ln\left(\frac{32mm}{26.2mm}\right) = 0.074m.K/W \quad (4.43)$$

#### 4.3.1.6 Resistencia de la tierra

La resistencia de la tierra es la inversa de la conductividad térmica del terreno

$$R_s = 0.83m.K/W \quad (4.44)$$

#### 4.3.1.7 Factor de utilización

El factor de utilización del sistema viene hacer el siguiente

$$f_{calefaccion} = 0.203 \quad (4.45)$$

#### 4.3.1.8 Longitud del intercambiador

con los resultados obtenidos anteriores se tiene la longitud del intercambiador.

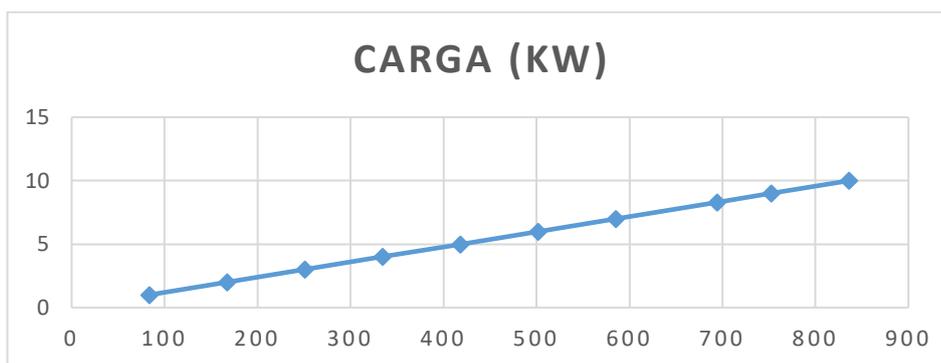
$$L_{calefaccion} = \frac{Q_{calefaccion} * \frac{COP - 1}{COP} * (R_p + R_s * f_{calefaccion})}{T_L - T_{MIN}} \quad (4.46)$$

$$L_{calefaccion} = \frac{8.3KW * \frac{5 - 1}{5} * (0.074mK/W + 0.83mK/W * 0.203)}{286.55^\circ K - 284.23^\circ K} \quad (4.47)$$

$$L_{calefaccion} = 694.02m \quad (4.48)$$

El la figura se observa el comportamiento de la longitud del colector con respecto a la carga térmica de calefacción, a medida que la carga térmica se incrementa es necesario también incrementar .la longitud de la tubería colector.

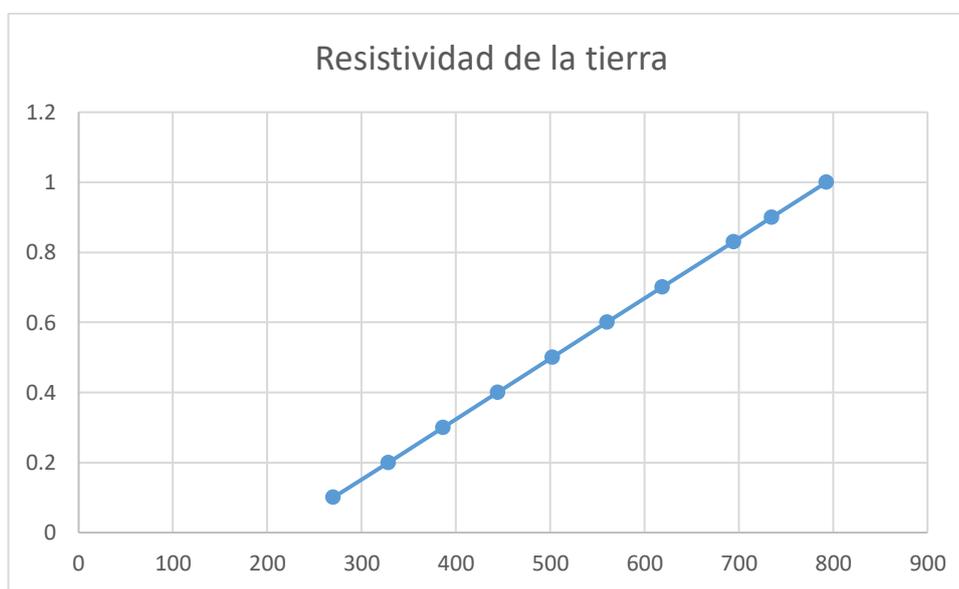
Figura N° 4.38 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la carga térmica de calefacción.



Elaboración: Propia

En la figura se observa a el comportamiento de la longitud del colector con respecto a la a la resistividad térmica de la tierra del lugar, mientras mayor sea la resistividad del terreno mayor será la longitud de la tubería colectora.

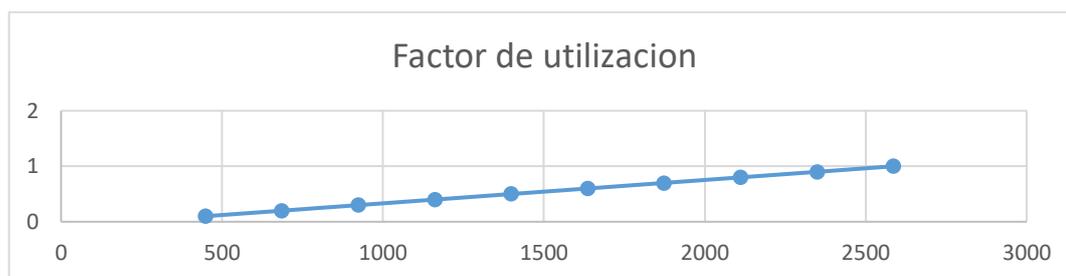
Figura N° 4.39 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la resistividad de la tierra



Fuente: elaboración Propia

En la figura se observa el comportamiento de la longitud del colector con respecto al factor de utilización, se concluye que le factor de utilización influye también en la longitud de la tubería colector.

Figura N° 4.40 Comportamiento de la longitud del colector con respecto al factor de utilización



Elaboración: Propia

En la figura se observa el comportamiento de la diferencia de temperaturas entre la temperatura mínima de la tierra y el fluido circulante en el colector, la longitud del colector es inversamente proporcional a la diferencia de temperaturas.

Figura N° 4.41 Comportamiento de la longitud del colector con respecto a la diferencia de temperaturas.



Elaboración: Propia

#### 4.3.1.9 Área del terreno para el intercambiador enterrado

Tabla 4.20 Características de la instalación del colector

Diámetro de la espira	1 m
Longitud de la trinchera	167.63 m
Separación de trincheras	1m
Profundidad de trinchera	2m
Área del terreno	150 m <sup>2</sup>

Elaboración: Propia

### 4.3.2 Comportamiento de la temperatura alrededor de un tubo enterrado

En las figuras se grafican las isotermas. Se observa que el efecto del tubo frío se propaga radialmente y las zonas cercanas al tubo disminuyen su temperatura considerablemente.

Figura N° 4.42 Variación de comportamiento de la temperatura

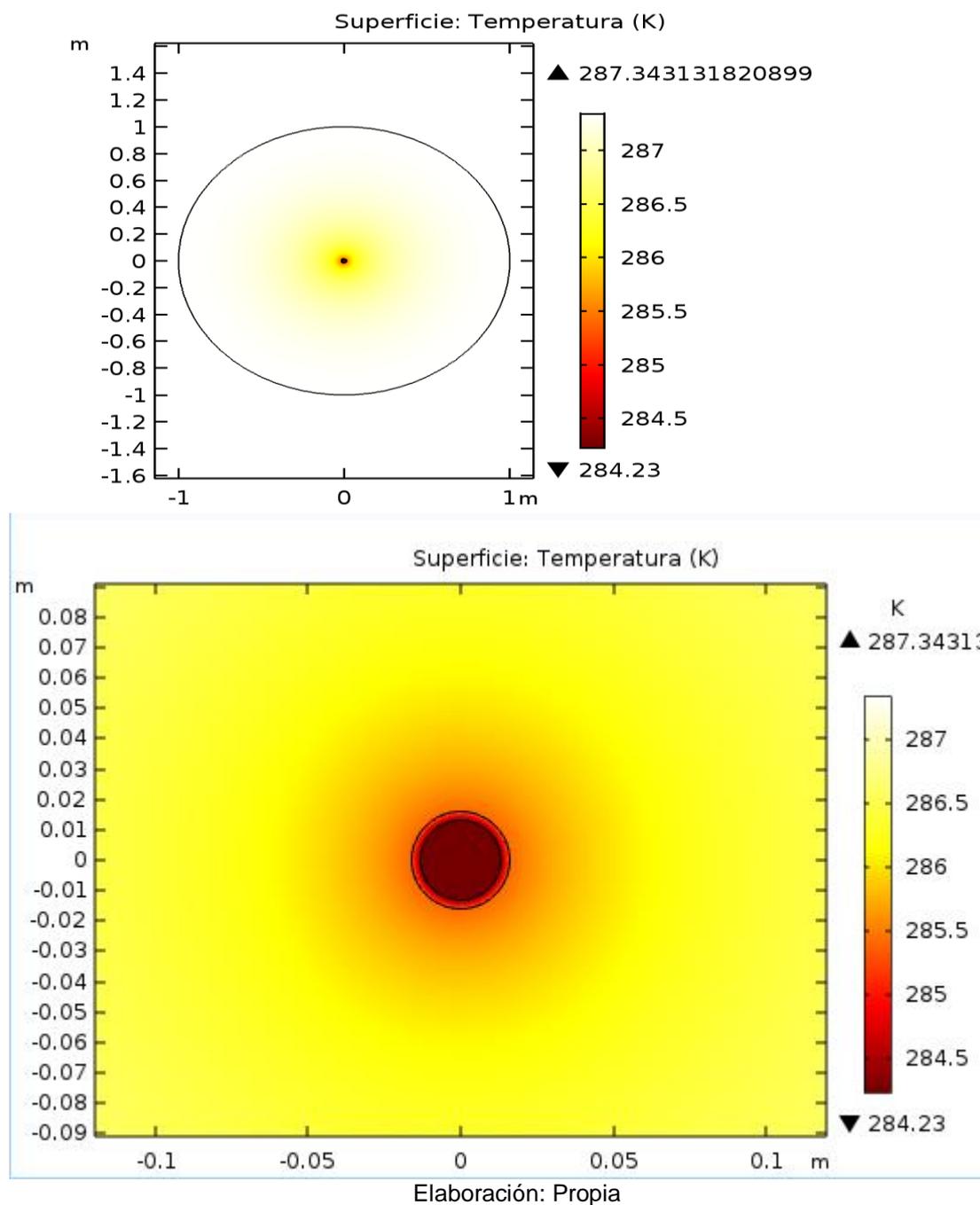
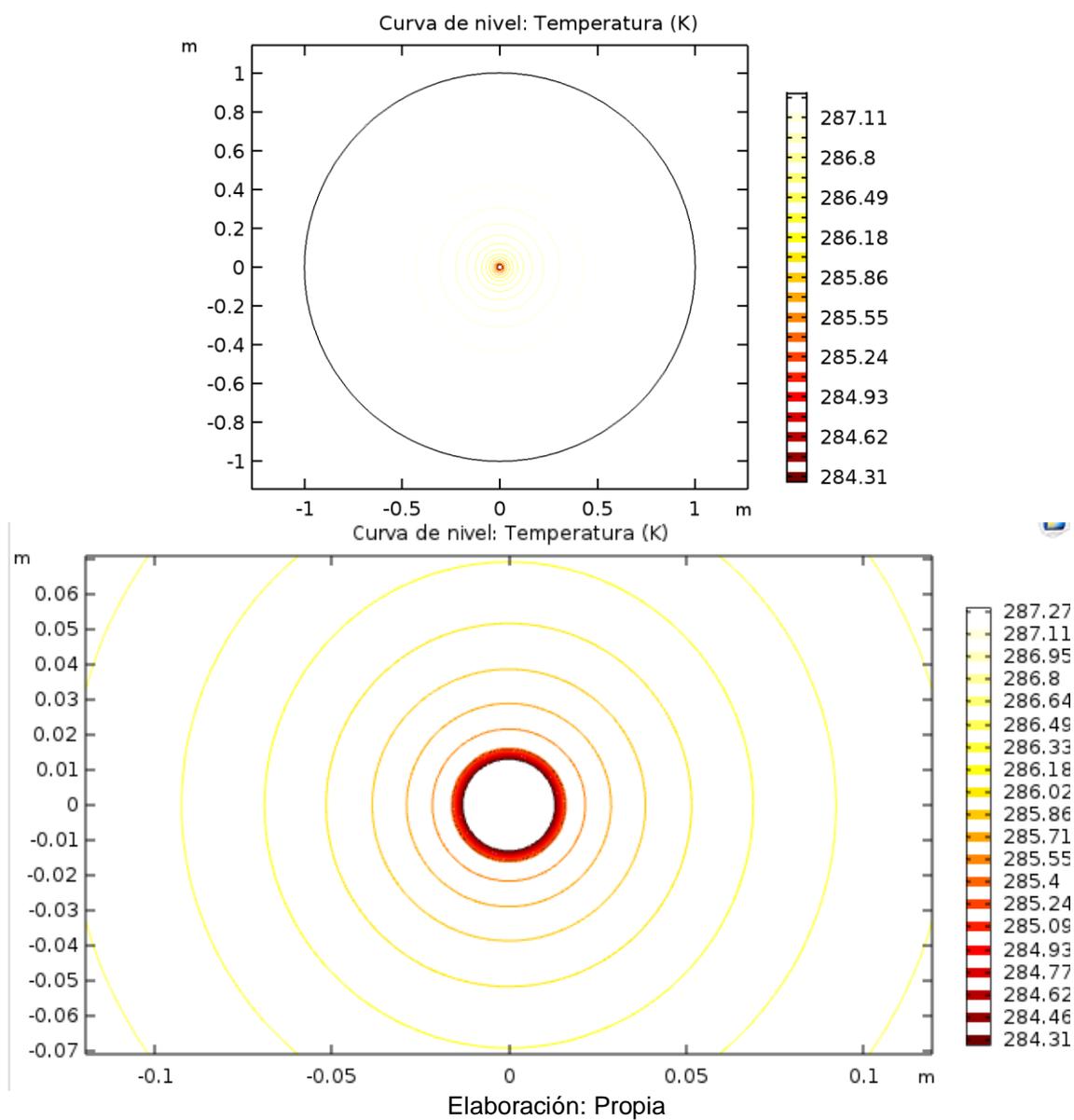


Figura N° 4.43 Curva de nivel de temperatura



## CAPÍTULO V.

### CONCLUSIONES

**PRIMERO:** Se ha hallado que el potencial geotérmico en la localidad de Paucarcolla es el adecuado ya que las temperaturas se mantienen constantes con respecto al tiempo a una profundidad de 2m como temperatura máxima de **14.00°C**, temperatura mínima de **12.60°C** y temperatura promedio de **13.41°C**.

**SEGUNDO:** El área disponible del terreno depende de la configuración elegida, en este caso se eligió la configuración horizontal y con tubos en slinky, en nuestro caso para una potencia de térmica de calefacción de **8.3 KW** fue necesario **694.02** metros de tubería y esto se traduce en un área total de **150 metros cuadrados**.

**TERCERO:** Es viable este tipo de climatización en la localidad de Paucarcolla en la configuración horizontal, ya que la vertical es de costo elevado para la perforación a más de 15 metros de profundidad, porque la geología del lugar es rocosa.

**CUARTO:** La eficiencia del sistema en modo de calefacción es el COP depende de las temperaturas de la tierra y del ambiente a climatizar. El COP de la bomba de calor viene dado en las características de fábrica y que existe en la actualidad de COP 4.5 – 6.

## CAPÍTULO VI.

### RECOMENDACIONES

**PRIMERO:** Para una mayor precisión en los cálculos, se debe obtener la resistividad correcta de la tierra en el lugar del estudio, para este propósito se debe aplicar *el ensayo de respuesta térmica* en futuras investigaciones.

**SEGUNDO:** Se recomienda, para la aplicación y diseño de este tipo de sistema de energía para calefacción de viviendas, hacer un estudio de las cargas térmicas y la temperatura de confort para así poder obtener un óptimo sistema de calefacción.

**TERCERO:** Se recomienda, hacer un estudio del factor de utilización de la bomba geotérmica para la zona y así poder hacer un diseño exacto del sistema de calefacción.

**CUARTO:** Por ultimo se recomienda, un estudio del sistema de la bomba de calor y sus componentes que intervienen en ella, para poder entender mejor su eficiencia que viene dada de fábrica.

## CAPÍTULO VII.

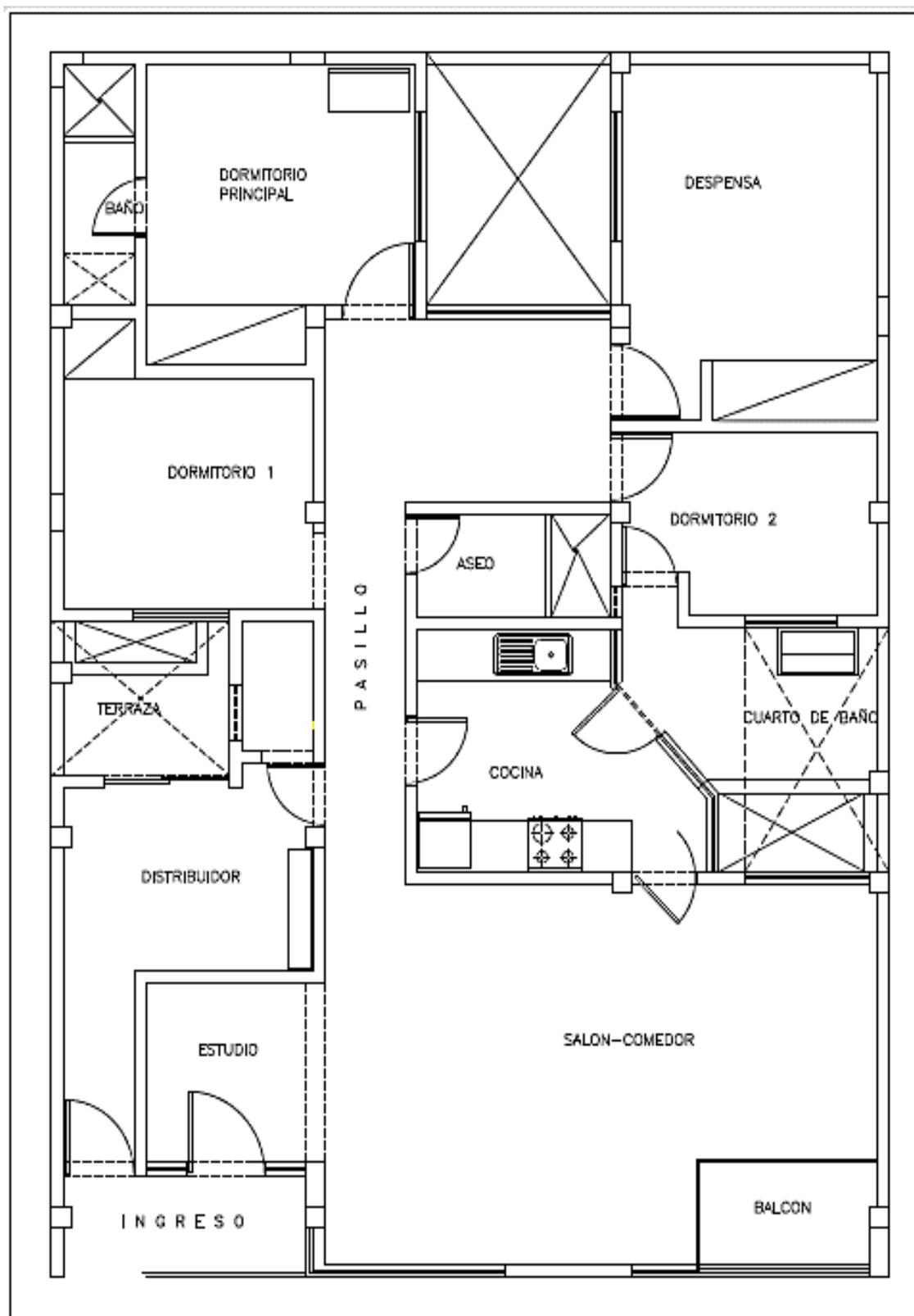
### REFERENCIAS

1. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). (2010). Guia Tecnica de Diseño de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica. Madrid, España.
2. Barrio, P. d. (Enero de 2014). APLICACION DE ENERGIA GEOTERMICA DE MUY BAJA ENTALPIA PARA LA CLIMATIZACION DE UN EDIFICIO DE OFICINAS EN ALCORCON (MADRID). Alcorcon, Madrid, España.
3. bastos Gonzales, G. (2015). Proyecto de instalación geotérmica para climatización y ACS de una vivienda unifamiliar en el municipio de O Porriño (Pontevedra). Leon, España.
4. Creus Sole, A. (2008). Energía Geotérmica de Baja Temperatura. Lerez , España.
5. Espada Serrano, V. (2010). estudio de Instalaciones de Climatización Geotérmicas en Viviendas. Catalunya, España.
6. Espada, S. V. (setiembre de 2012). estudios de instalación de climatización geotérmicas en viviendas. catalunya, barcelona, españa.
7. Gonzalez Elosua, I. I. (noviembre de 2013). Climatización de una vivienda con energía geotérmica. Leganes, Madrid, España.
8. Llopis Trillo, G., & Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guia de la Energía Geotérmica*. madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
9. Lopez Lopez, J. (2012). Diseño y Cálculo de la Climatización de una Vivienda Unifamiliar Mediante Energía Geotérmica. Linares, españa.
10. Martin, M. d. (Diciembre de 2015). Análisis de la energía geotérmica de baja temperatura en terrenos volcánicos. aplicaciones a la construcción en Tenerife.

11. Pérez Ramirez de Arellano, A. (julio de 2015). proyecto de instalación de geotérmica de muy baja entalpía destinada a refrigeración de vivienda unifamiliar. valencia, españa.
12. Rodriguez Fernandez, I. (junio de 2012). energía geotérmica de muy baja entalpía para calentamiento de aguas y piscinas y refrigeración en el complejo deportivo municipal de parquesol. valladolid, españa.
13. Rodriguez, A. (2011). Cálculo de una Instalación Geotérmica. Catalunya, España.
14. Santilli, A. (2014). energía geotérmica de baja entalpía: comprobación de presencia y análisis conceptual de aprovechamiento. Cuyo, Argentina.
15. Seisdedos Sáez, M. A. (junio de 2012). Climatización de Edificios por Medio del Intercambio de Calor con el Subsuelo y Agua Subterráneo Aspectos a Considerar en el Contexto Local . Santiago de Chile, Chile.
16. Torres Cruces, J. B. (2017). climatización de sala multiuso mediante energía geotérmica de baja entalpía. Santiago de Chile, Chile.

## ANEXOS

### ANEXO 1 Distribución de espacios de las cargas térmicas



(Bastos Gonzales, 2015)

### ANEXO 2 Cálculo de las cargas térmicas.

En este proyecto se ha simplificado el cálculo de las cargas térmicas de cada uno de los espacios, usando el valor medio de  $W/m^2$  de calefacción para la zona donde se ubica la vivienda unifamiliar objeto de estudio, este valor es de  $60 W/m^2$  y a partir de él se han realizado los siguientes cálculos:

Salón-comedor: Superficie= $28,12 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 28,12 m^2 = 1666,816 W = 1,67 kW$$

Cocina+despensa: Superficie= $31,29 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 31,29 m^2 = 1854,718 W = 1,85 kW$$

Pasillo+distribuidor: Superficie= $16,65 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 16,65 m^2 = 986,930 W = 0,99 kW$$

Dormitorio principal: Superficie= $14,53 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 14,53 m^2 = 861,267 W = 0,86 kW$$

Cuarto de baño: Superficie= $7,39 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 7,39 m^2 = 438,048 W = 0,44 kW$$

Estudio: Superficie= $8,77 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 8,77 m^2 = 519,843 W = 0,52 kW$$

Aseo: Superficie= $7,29 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 7,29 m^2 = 432,115 W = 0,43 kW$$

Dormitorio 2: Superficie= $13,32 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 13,32 m^2 = 789,544 W = 0,79 kW$$

Dormitorio 3: Superficie= $12,60 m^2$

$$\text{carga térmica del salón(kW)} = 60 \frac{W}{m^2} \times 12,60 m^2 = 746,866 W = 0,75 kW$$

Esto hace una carga térmica de calefacción total de  $8,3 kW$ .

(Bastos Gonzales, 2015)

*ANEXO 3 Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos tipos de materiales*

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	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
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	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
<b>Rocas sedimentarias</b>				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
<b>Rocas no consolidadas</b>				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
<b>Otros materiales</b>				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	aprox. 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

(Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

ANEXO 4 Características técnicas de la bomba de calor seleccionada

Características técnicas de la bomba ecoGEO C2 3-12 kW		
Aplicación	Calefacción y ACS	Si
	Acumulador ACS integrado 170l	Si
	Refrigeración activa	No
	Refrigeración pasiva integrada	Si
Refrigerante	Tipo	R410A
Componentes	Compresor	Scroll con Inverter de Copeland
	Válvula de expansión	Electrónica Carel
	Intercambiadores	Placas Alfa Laval
	Bombas circuladoras	V variable de alta eficiencia Wilo
	Acumulador ACS con sepentín	Acumulador y serpentín INOX316
	Vasos de expansión integrados	Cto calefacción y cto. captación
Datos eléctricos	Tensión alimentación	230V/50Hz, 1/N/PE-
	Protección magnetotérmica	32 A
Eficiencia	Potencia calorífica	3-15 kW
	Potencia calorífica	3-14 kW
	Consumo eléctrico	0,7-3,2 kW
	COP	4,6-5
	EER	6,1-6,9
	Potencia frigorífica	-
	Potencia refrigeración pasiva	6 kW
Circuito frigorífico	Carga refrigerante	1,35 kg
	Presión funcionamiento máximo	42 bar
	Tipo aceite compresor	POE
	Carga aceite compresor	2 kg
Circuito calefacción	Temperaturas máxima/mínima	60/20 °C
	Presión funcionamiento máxima	3 bar
	Caudal nominal	1200-4500 l/h
Circuito captación	Temperaturas máxima/mínima	20/-10 °C
	Circuito captadores	3 bar
	Caudal nominal	1200-4500 l/h
	Anticongelante recomendado	Propilenglicol/agua -17+/- 2 °C
ACS	Volumen acumulación ACS	170 l
	Presión funcionamiento máxima	8 bar
	Temperatura máxima sin apoyo	55 °C
	Temperatura máxima con apoyo	75 °C
Insonorización	Nivel emisión sonora	42 dB
Dimensiones	Alto x ancho x fondo	1800 x 600 x 700 mm
Peso	Peso en vacío (sin ensamblaje)	260 kg

Fuente: (Bastos Gonzales, 2015)

ANEXO 5 Propiedades físicas de los fluidos

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol	Metanol
Densidad a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12	-26
Punto ebullición °C	100	197	187	64
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371	2,47021
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 <sup>-3</sup>	0,655	9,5	18,0	0,45
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 <sup>-3</sup>	0,60	0,26	0,20	0,21

Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

ANEXO 6 Principales características de los tubos

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	0,40678
		1 1/4"	32	28,0	0,40678
		1 1/2"	40	35,2	0,40678
		2"	50	44,0	0,40678
		2 1/2"	63	55,4	0,40678
	6	3/4"	20	16,0	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	0,40678
		1 1/4"	32	23,2	0,40678
		1 1/2"	40	29,0	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	0,43
		1 1/4"	32	28,0	0,43
		1 1/2"	40	35,2	0,43
		2"	50	44,0	0,43
		2 1/2"	63	55,4	0,43
	10	3/4"	20	16,0	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	0,43
		2"	50	36,2	0,43
		2 1/2"	63	45,8	0,43

(Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

POLIETILENO					
Tipo	Presión (Bar)	Diam Nominal (Pul)	DN=Do Exterior (mm)	Di Interior (mm)	Kp (W/m K)
PE50B	6	3/4"	-	-	0,29
		1"	25	21,0	0,29
		1 1/4"	32	28,0	0,29
		1 1/2"	40	35,2	0,29
		2"	50	44,0	0,29
		2 1/2"	63	55,4	0,29
	10	3/4"	20	16,0	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	0,29
		1 1/4"	32	23,2	0,29
		1 1/2"	40	29,0	0,29
		2"	50	36,2	0,29
		2 1/2"	63	45,8	0,29
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	0,43
	10	3/4"	20	16,0	0,43
		1"	25	21,0	0,43
		1 1/4"	32	27,2	0,43
		1 1/2"	40	34,0	0,43
		2"	50	42,6	0,43
		2 1/2"	63	53,6	0,43

Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

POLIETILENO					
Tipo	Presión (Bar)	Diam Nominal (Pul)	DN=Do Exterior (mm)	Di Interior (mm)	Kp (W/m K)
PE100	6	3/4"	20	16,0	0,43
		1"	25	21,0	0,43
		1 1/4"	32	28,0	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	0,43
		1"	25	21,0	0,43
		1 1/4"	32	27,2	0,43
		1 1/2"	40	35,2	0,43
		2"	50	44,0	0,43
		2 1/2"	63	55,4	0,43
	16	3/4"	20	16,0	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	0,43
		1 1/4"	32	23,2	0,43
1 1/2"		40	29,0	0,43	
2"		50	36,2	0,43	
2 1/2"		63	45,8	0,43	

Fuente: (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), 2010)

ANEXO 7 Cálculo del factor de utilización. Modo calefacción de invierno

T media	Rango T (°C)	Text Media	Bin Hours	Carga (kW)	Potencia bomba (kW)	Fracción marcha	Horas marcha
JUNIO							
9,3	0-0,9	0,5	5	4,675	11,5	0,41	2,03
9,3	1-1,9	1,5	8	4,365	11,5	0,38	3,04
9,3	2-2,9	2,5	20	4,055	11,5	0,35	7,05
9,3	3-3,9	3,5	65	3,745	11,5	0,33	21,17
9,3	4-4,9	4,5	77	3,435	11,5	0,30	23,00
9,3	5-5,9	5,5	80	3,125	11,5	0,27	21,74
9,3	6-6,9	6,5	82	2,815	11,5	0,24	20,07
9,3	7-7,9	7,5	75	2,505	11,5	0,22	16,34
9,3	8-8,9	8,5	70	2,195	11,5	0,19	13,36
9,3	9-9,9	9,5	61	1,885	11,5	0,16	10,00
9,3	10-10,9	10,5	53	1,575	11,5	0,14	7,26
9,3	11-11,9	11,5	42	1,265	11,5	0,11	4,62
9,3	12,12,9	12,5	24	0,955	11,5	0,08	1,99
9,3	13-13,9	13,5	15	0,645	11,5	0,06	0,84
JULIO							
8,4	0-0,9	0,5	13	4,675	11,5	0,41	5,28
8,4	1-1,9	1,5	21	4,365	11,5	0,38	7,97
8,4	2-2,9	2,5	43	4,055	11,5	0,35	15,16
8,4	3-3,9	3,5	69	3,745	11,5	0,33	22,47
8,4	4-4,9	4,5	78	3,435	11,5	0,30	23,30
8,4	5-5,9	5,5	84	3,125	11,5	0,27	22,83
8,4	6-6,9	6,5	76	2,815	11,5	0,24	18,60
8,4	7-7,9	7,5	68	2,505	11,5	0,22	14,81
8,4	8-8,9	8,5	61	2,195	11,5	0,19	11,64
8,4	9-9,9	9,5	50	1,885	11,5	0,16	8,20
8,4	10-10,9	10,5	44	1,575	11,5	0,14	6,03
8,4	11-11,9	11,5	32	1,265	11,5	0,11	3,52
8,4	12,12,9	12,5	19	0,955	11,5	0,08	1,58
8,4	13-13,9	13,5	15	0,645	11,5	0,06	0,84
AGOSTO							
10	0-0,9	0,5	3	4,675	11,5	0,41	1,22
10	1-1,9	1,5	4	4,365	11,5	0,38	1,52
10	2-2,9	2,5	7	4,055	11,5	0,35	2,47
10	3-3,9	3,5	15	3,745	11,5	0,33	4,88
10	4-4,9	4,5	43	3,435	11,5	0,30	12,84
10	5-5,9	5,5	65	3,125	11,5	0,27	17,66
10	6-6,9	6,5	81	2,815	11,5	0,24	19,83
10	7-7,9	7,5	82	2,505	11,5	0,22	17,86
10	8-8,9	8,5	77	2,195	11,5	0,19	14,70
10	9-9,9	9,5	68	1,885	11,5	0,16	11,15
10	10-10,9	10,5	63	1,575	11,5	0,14	8,63
10	11-11,9	11,5	54	1,265	11,5	0,11	5,94
10	12,12,9	12,5	42	0,955	11,5	0,08	3,49
10	13-13,9	13,5	25	0,645	11,5	0,06	1,40

Total horas marcha	438,33
Total horas meses	2160,00
Fracción horas marcha	0,203

Fuente: (Lopez Lopez, 2012)

*ANEXO 8 Imagen de equipos adquiridos*



Elaboración: Propia

*ANEXO 9 Imagen de las sondas de temperatura PT-100*



Elaboración: Propia

*ANEXO 10 Imagen del lugar de instalación*



Elaboración: Propia

*ANEXO 11 Imagen de las sondas PT-100*



Elaboración: Propia

*ANEXO 12 Imagen de la instalación de las sondas PT-100 en el pozo*



Elaboración: Propia

*ANEXO 13 Imagen de Sensor para obtención de temperatura de ambiente*



Elaboración: Propia

*ANEXO 14 Imagen del PLC Schneider Electric,*



Elaboración: Propia

*ANEXO 15 Imagen de la instalación del cable datos de las sondas PT-100*



Elaboración: Propia