



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE CALEFACCIÓN DISTRITAL UTILIZANDO DISTINTOS
SISTEMAS DE CAPTACIÓN GEOTÉRMICA EN COCHRANE, AYSÉN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

VALENTINA DANAE VICENCIO SURA

PROFESOR GUÍA:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIEGO MORATA CÉSPEDES
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

ESTUDIO DE CALEFACCIÓN DISTRITAL UTILIZANDO DISTINTOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN GEOTÉRMICA EN COCHRANE, AYSÉN

Actualmente, la contaminación debido al uso de leña es uno de los principales problemas energéticos de la región de Aysén, volviendo indispensable el estudio de alternativas de calefacción con energías limpias. En este marco se propone como solución la energía geotérmica de muy baja entalpía, una energía renovable que debido a su alta estabilidad estacional es ideal dada la ubicación extrema de la localidad de estudio, Cochrane. Además, se propone un sistema distrital debido a su alta eficiencia, en donde la generación de energía se realiza de forma centralizada y luego se reparte a las viviendas a través de un sistema de cañerías.

Entonces, el objetivo de la presente memoria es estudiar un sistema de calefacción distrital a baja escala utilizando distintos tipos de captación geotérmica y tecnologías de calefacción en un conjunto habitacional de entre 5 a 50 viviendas en la localidad de Cochrane.

Para esto, se estudian las cargas térmicas de una vivienda nueva energéticamente eficiente y a partir de datos climatológicos se identifica la demanda en calefacción para cada vivienda. Con la carga por vivienda se evalúa un sistema de calefacción con suelo radiante o con radiadores de baja temperatura, identificando los equipos y materiales principales a utilizar.

Para la generación y distribución de energía se estudian 5 sistemas de captación geotérmica: vertical abierto, vertical cerrado (simple U y doble 2U) y horizontal cerrado (simple y slinky), dimensionando para producir agua caliente a 35 y a 55 [°C]. Tanto para la generación como la distribución se escogen equipos principales utilizando parámetros del suelo de localidades aledañas para el dimensionamiento. Finalmente, se calcula el costo nivelado de energía (LCOE) para comparar entre los casos de estudio y otros sistemas de generación de energía.

Con los resultados obtenidos se concluye que el sistema geotérmico de captación vertical abierto presenta las mejores ventajas a nivel técnico-económico para la implementación distrital, sin embargo, dado que no existen estudios hidrológicos de la zona es el que presenta mayor incertidumbre. Es por este motivo que el sistema de captación cerrada vertical doble (2U) sería el más factible para esta localidad.

Se demostró además que al aumentar el número de viviendas existe una tendencia a la baja del LCOE, por lo que un sistema distrital tiene ventajas económicas con respecto a la generación por cada vivienda. Además, a pesar de que en todos los casos estudiados se reducen los costos operacionales con respecto al gasto actual en calefacción por leña, se determina que el sistema no es económicamente factible desde el punto de vista de una inversión privada y solo podría considerarse aceptable si se evalúa desde el punto de vista público.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi mamá y papá por el apoyo, el amor y por darme las oportunidades y herramientas para poder llegar donde estoy hoy, sin ustedes nada de esto sería posible.

A mi hermano Ismael por ser mi ejemplo a seguir desde chica y de grande, por mostrarme que la vida es muy corta para no hacer lo que te gusta. A Matías, por ser el amigo que me ha acompañado en cada paso y por creer en mi.

A mi gran compañera de vida Tamara, por el amor infinito y la felicidad, por apañarme en todo este proceso, por confiar en mi y alentarme a seguir. A los cabros de la U, en especial a la Ale, mi primera gran amiga en la universidad, por todos los buenos momentos y por hacer de plan común algo mejor. A Joaquín, Vicente, Raúl y José por haber sido lo mejor de mi paso por mecánica, gracias a ustedes disfruté cada día.

También a todos los profesores que entregaron lo mejor de sí para ayudar en mi formación, en especial a aquellos que despertaron en mí el interés por las energías renovables. Al profesor Álvaro Valencia por su apoyo y la oportunidad de desarrollar esta memoria con él. Al profesor Diego Morata, quien me inspiró hace unos años al estudio de la geotermia y a Mauricio Muñoz del CEGA por la disposición a responder todas las dudas que tuve durante este proceso.

Y a todos aquellos con los que me topé en este camino e hicieron de esta travesía una gran experiencia, llena de buenos momentos y recuerdos.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes generales	4
2.1. Localidad de Cochrane	4
2.2. Situación actual	5
2.3. Solución propuesta	7
2.3.1. Casos en Chile	8
2.4. Disponibilidad de terreno	10
3. Marco teórico	11
3.1. Vivienda	12
3.1.1. Cargas térmicas	12
3.1.1.1. Cargas por transmisión	13
3.1.1.2. Cargas por ventilación e infiltraciones	14
3.1.1.3. Ganancias solares	15
3.1.1.4. Ganancias internas	18
3.1.2. Sistema de calefacción	18
3.1.2.1. Suelo radiante	18
3.1.2.2. Radiadores	23
3.1.2.3. Diseño hidráulico	26
3.1.2.3.1. Caudal requerido en una instalación térmica	26
3.1.2.3.2. Pérdidas de carga	26
3.1.2.3.3. Bombas circuladoras	28
3.1.2.3.4. Vaso de expansión	29
3.1.3. Demanda conjunto habitacional	30
3.2. Red de distribución	31
3.2.1. Equipos principales	31
3.2.1.1. Tuberías	31
3.2.1.1.1. Tipos de tuberías	31
3.2.1.1.2. Configuración	33
3.2.1.1.3. Pérdidas térmicas	33
3.2.1.2. Bombas	36

3.2.1.3.	Válvulas	36
3.2.2.	Diseño hidráulico	37
3.2.3.	Densidad de conexión	38
3.3.	Planta de generación	39
3.3.1.	Equipos principales	39
3.3.1.1.	Intercambiadores de calor geotérmicos	40
3.3.1.2.	Bombas de calor	41
3.3.1.3.	Estanque de inercia	42
3.3.1.4.	Otros componentes	43
3.3.2.	Intercambiadores de calor cerrados	43
3.3.2.1.	Fluidos y materiales de trabajo	43
3.3.2.2.	Configuración del circuito	45
3.3.2.3.	Dimensionamiento	46
3.3.2.3.1.	Horizontal cerrado	49
3.3.2.3.2.	Vertical cerrado	53
3.3.3.	Intercambiador de calor vertical abierto	56
3.3.3.1.	Diseño de sistemas abiertos	57
3.3.3.2.	Equipos auxiliares	58
3.4.	Evaluación económica	60
4.	Desarrollo	61
4.1.	Vivienda	61
4.1.1.	Cargas térmicas	61
4.1.2.	Suelo radiante	70
4.1.3.	Radiadores	74
4.2.	Red de distribución	77
4.3.	Sistema de generación con energía geotérmica	84
4.3.1.	Sistemas de captación	86
4.3.1.1.	Horizontal cerrado	86
4.3.1.2.	Vertical cerrado	90
4.3.1.3.	Vertical Abierto	96
4.4.	Costos proyecto	98
4.4.1.	Costos inversión	98
4.4.2.	Costos mantención	106
4.4.3.	Costos operacionales	106
4.4.4.	Otras tecnologías	108
5.	Resultados	109
5.1.	Cargas térmicas	109
5.2.	Red de distribución	111
5.3.	Sistema de generación con energía geotérmica	113
5.4.	Costos proyecto	120
6.	Análisis de resultados	125
7.	Conclusiones	133
	Bibliografía	135

Anexo A. Hojas de cálculo	139
Anexo B. Curvas de operación Bombas de calor	144
B.1. COP	144
B.2. Pérdidas de carga	147
Anexo C. Propiedades del fluido caloportador	149
Anexo D. Cotizaciones y fichas técnicas	152
D.1. Radiadores	152
D.2. Suelo radiante	153
D.3. Bombas circuladoras	154
D.4. Tuberías y sondas	156
D.5. Bombas de calor Ecoforest	159
D.6. Vaso de Expansión	160
D.7. Estanque de inercia	160
D.8. Intercambiador de calor de placas	161
D.9. Servicios	161
D.9.1. Movimiento de tierras	161
D.9.2. Perforación para sistemas verticales cerrados - Aysén Drilling	162

Índice de Tablas

3.1.	Renovaciones de aire para las distintas zonas climáticas	15
3.2.	Fracción de ocupación en las viviendas de Chile	18
3.3.	Espesor de aislamiento en cañerías y accesorios en sistemas interiores de calefacción [21]	25
3.4.	Valor K en accesorios [43]	27
3.5.	Características de los fluidos de intercambiador de calor cerrado [10]	44
3.6.	Diámetro requerido por bomba y tubería en función del caudal de extracción .	58
4.1.	Superficie de elementos según orientación	61
4.2.	Superficie de ventana según orientación	62
4.3.	Transmitancias máximas para zona térmica del sur extremo	64
4.4.	Parámetros de entrada para pérdidas por ventilación	65
4.5.	Ángulo azimut según orientación de la fachada	66
4.6.	Propiedades de elemento translúcido [8]	68
4.7.	Propiedades de elementos opacos [8]	68
4.8.	Horas de funcionamiento y potencia de calefacción por vivienda	70
4.9.	Datos de vivienda a considerar para suelo radiante	71
4.10.	Flujo de calor máximo por habitación	71
4.11.	Componentes del piso radiante [4]	72
4.12.	Propiedades de revestimiento [4]	72
4.13.	Flujo de calor para revestimiento de cerámica y piso flotante	72
4.14.	Resistencias térmicas sobre y bajo tuberías	73
4.15.	Propiedades de la tubería y fluido en suelo radiante	73
4.16.	Caudal y pérdida de carga en suelo radiante	73
4.17.	Dimensionamiento vaso expansión	74
4.18.	Datos de vivienda a considerar para radiadores	75
4.19.	Resultados de radiadores	76
4.20.	Resultados de radiadores	76
4.21.	Largos de la red de distribución	78
4.22.	Propiedades del suelo [5]	79
4.23.	Factores de temperatura en red de distribución	80
4.24.	Red de distribución - 35°C	82
4.25.	Red de distribución - 55°C	82
4.26.	Vaso de expansión para red de distribución	83
4.27.	Bombas de calor escogidas	85
4.28.	Estanques de inercia requeridos	86
4.29.	Propiedades del agua con 20 % de etilenglicol	86
4.30.	Resultados para intercambiador Horizontal	88
4.31.	Resultados para intercambiador Slinky	88

4.32.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación horizontal .	89
4.33.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación slinky	90
4.34.	Resistencia térmica de perforación vertical cerrada	90
4.35.	Resultados para intercambiador Vertical U - 80 [m]	93
4.36.	Resultados para intercambiador Vertical U - 120 [m]	93
4.37.	Resultados para intercambiador Vertical 2U - 80 [m]	93
4.38.	Resultados para intercambiador Vertical 2U - 120 [m]	94
4.39.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical U - 80 [m]	94
4.40.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical U - 120 [m]	94
4.41.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical 2U - 80 [m]	95
4.42.	Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical 2U - 120 [m]	95
4.43.	Costos de inversión en suelo radiante [2] [4][44] [57]	98
4.44.	Costos de inversión en radiadores [2] [38][44] [57]	99
4.45.	Costo de inversión en red de distribución - caso 35 °C [57] [2] [31]	100
4.46.	Costo de inversión en red de distribución - caso 55 °C [57] [2] [31]	100
4.47.	Costo de instalación BCG [14]	101
4.48.	Inversión en captación horizontal [2] [33] [26] [49]	101
4.49.	Inversión en captación horizontal - 35 °c [2] [33] [26] [49]	102
4.50.	Inversión en captación slinky - 35 °c [2] [33] [26] [49]	102
4.51.	Inversión en captación slinky - 55 °C [2] [33] [26] [49]	102
4.52.	Inversión en captación vertical U - 55 °C [2] [33] [26] [49]	103
4.53.	Inversión en captación vertical U - 35 °C [2] [33] [26] [49]	103
4.54.	Inversión en captación vertical 2U - 35 °C [2] [33] [26] [49]	103
4.55.	Inversión en captación vertical 2U - 55 °C [2] [33] [26] [49]	104
4.56.	Inversión en captación vertical U - 55 °C [2] [33] [26] [49]	104
4.57.	Inversión en captación vertical U - 35 °C [2] [33] [26] [49]	104
4.58.	Inversión en captación vertical 2U - 35 °C [2] [33] [26] [49]	105
4.59.	Inversión en captación vertical 2U - 55 °C [2] [33] [26] [49]	105
4.60.	Inversión en captación vertical abierta - 55 °C [2] [26] [44]	105
4.61.	Inversión en captación vertical abierta - 35°C [2] [26] [44]	106
4.62.	Costo de mantención preventiva BCG según potencia [14]	106
4.63.	Consumo eléctrico en BCG y distribución	107
4.64.	Consumo eléctrico en bombeo de sistema geotérmico	107
4.65.	Consumo eléctrico en bombeo de sistema geotérmico	107
5.1.	Densidad de conexión	111
5.2.	Pérdida de carga y velocidad en red de distribución	111
5.3.	Resultados para intercambiador Horizontal	113
5.4.	Resultados para intercambiador Slinky	114
5.5.	Resultados para intercambiador vertical U - 80 [m]	115
5.6.	Resultados para intercambiador vertical U - 120 [m]	116
5.7.	Resultados para intercambiador vertical 2U - 80 [m]	116
5.8.	Resultados para intercambiador vertical 2U - 120 [m]	117
5.9.	Caudal pozo	117

5.10.	Número de perforaciones o trincheras según sistema de captación	118
5.11.	Resumen de la inversión - Suelo radiante - 20 viviendas	120
5.12.	Valor de inversión total por vivienda en sistemas verticales	122
5.13.	Valor de inversión total por vivienda en sistemas horizontales	122
A.1.	Pérdidas térmicas en red de distribución - 35 °C	140
A.2.	Pérdidas térmicas en red de distribución - 35°C	141
A.3.	Pérdidas térmicas en red de distribución - 55°C	142
A.4.	Pérdidas térmicas en red de distribución - 55°C	143

Índice de Ilustraciones

2.1.	Tipos de vivienda [42]	5
2.2.	Emisiones MP10 en Cochrane	6
2.3.	Emisiones MP2.5 en Cochrane	6
2.4.	Condominio Frankfurt en Temuco [27]	8
2.5.	Sistema de extracción en colegio de Coyhaique [44]	9
2.6.	Disponibilidad de terrenos	10
3.1.	Esquema general de sistema de calefacción distrital [41]	11
3.2.	Mecanismos de transferencia de calor en la vivienda [8]	12
3.3.	Valores recomendados de transmitancia térmica [23]	14
3.4.	Porcentaje máximo de superficie vidriada por orientación según zona térmica [23]	14
3.5.	Conceptos de absortividad, transmisividad y reflectividad [8]	16
3.6.	Perfil óptimo de temperatura	19
3.7.	Componentes del suelo radiante	19
3.8.	Configuraciones de suelo radiante	20
3.9.	Esquema de sistema de control	21
3.10.	Temperaturas en una habitación con radiadores	24
3.11.	Circuito de calefacción con radiadores	24
3.12.	Tuberías superficiales de la red de distribución [41]	31
3.13.	Tuberías subterráneas de la red de distribución [41]	32
3.14.	Tipos de configuración de la red de distribución [39]	33
3.15.	Tuberías de la red de distribución [41]	34
3.16.	Densidad de conexión recomendada en red de distribución [22]	38
3.17.	Esquema general del sistema de generación con geotermia	39
3.18.	Tipos de sistemas de captación [4]	40
3.19.	Bomba de calor [29]	41
3.20.	Punto de congelamiento para mezcla de agua y etilenglicol o propilenglicol [30]	44
3.21.	Trayectoria del fluido en serie o paralelo para el caso vertical y horizontal [17]	46
3.22.	Método de tubos imagen para el caso de intercambiadores de calor horizontales	48
3.23.	Intercambiadores de calor horizontal	50
3.24.	Lazo simple. Fuente: Manual técnico geotermia [56]	51
3.25.	Parámetros de la geometría del sistema Slinky	52
3.26.	Esquema de la zanja horizontal slinky	52
3.27.	Perforación simple y doble U	53
3.28.	Resistencias en vertical U	54
3.29.	Resistencias en vertical 2U	55
3.30.	Pozo de extracción y reinyección [50]	57
3.31.	Intercambiador de placas en sistema de captación abierto [50]	58
4.1.	Plano vivienda de Cochrane	62

4.2.	Temperatura promedio en Cochrane	63
4.3.	Velocidad del viento	63
4.4.	Cargas por transmisión en los distintos elementos constructivos para el mes de Junio	64
4.5.	Cargas por ventilación horarias para el mes de Junio y Enero	65
4.6.	Radiación promedio diaria en Cochrane según orientación en superficie vertical	66
4.7.	Radiación promedio diaria en superficie inclinada 25°	67
4.8.	Radiación promedio horaria en superficie inclinada 25°.	67
4.9.	Ganancias solares según tipo de elemento	68
4.10.	Cargas internas en la vivienda	69
4.11.	Elementos del piso radiante	71
4.12.	Esquema ubicación de radiadores en vivienda	75
4.13.	Esquema conjunto habitacional	77
4.14.	Tubería UPONOR Ecoflex preaisladas para distribución [57]	78
4.15.	Temperatura del suelo a distintas profundidades en Cochrane.	79
4.16.	Disposición de las tuberías de distribución en las trincheras	80
4.17.	Esquema de componentes principales de red de distribución propuesta	81
4.18.	Curva de operación de BCG Ecoforest 5-22 kW	85
4.19.	Resistencia térmica del suelo en campo geotérmico horizontal	87
4.20.	Resistencia térmica del suelo en campo geotérmico slinky	87
4.21.	Esquema del grupo de generación geotérmica cerrado	89
4.22.	Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 1 fila	91
4.23.	Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 2 filas	91
4.24.	Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 3 filas	91
4.25.	Temperatura del suelo a profundidades	92
4.26.	Diagrama del sistema de captación abierto	96
4.27.	Medición de temperatura y nivel estático para captar agua subterránea en la ciudad de Coyhaique [40]	97
5.1.	Cargas térmicas promedio diarias	109
5.2.	Cargas térmicas horarias promedio para mes de Junio	110
5.3.	Cargas térmicas horarias promedio para mes de Enero	110
5.4.	Pérdidas térmicas	111
5.5.	Pérdidas de carga por metro en red de distribución	112
5.6.	Largo intercambiador Horizontal	113
5.7.	Largo intercambiador Horizontal - Slinky	114
5.8.	Largo intercambiador vertical U - 80 [m]	115
5.9.	Largo intercambiador vertical U - 120 [m]	115
5.10.	Largo intercambiador vertical 2U - 80 [m]	116
5.11.	Largo intercambiador vertical 2U - 120 [m]	117
5.12.	Largos de los distintos tipos de sistemas de captación	118
5.13.	Rendimientos de los distintos tipos de sistemas de captación	118
5.14.	Esquema general para 20 viviendas que utiliza sistema vertical 2U con profundidad de 72 [m]	119
5.15.	Comparación en la inversión en generación con perforaciones de 80 y 120 [m]	120
5.16.	Proporción de los costos de inversión en los distintos sistemas de generación	121
5.17.	Proyección de los costos de inversión en los distintos sistemas de generación según número de viviendas	121

5.18.	Costo mensual en electricidad por vivienda	122
5.19.	LCOE para los distintos números de vivienda - caso horizontal	123
5.20.	LCOE para los distintos números de vivienda - caso vertical cerrado U	123
5.21.	LCOE para los distintos números de vivienda - caso vertical cerrado 2U	123
5.22.	LCOE para los distintos números de vivienda - caso abierto	124
5.23.	LCOE privado promedio según sistema geotérmico	124
5.24.	LCOE público promedio según sistema geotérmico	124
B.1.	COP BCG 3-13 kW	144
B.2.	COP BCG 3-13 kW	144
B.3.	COP BCG 5-22	145
B.4.	COP BCG 5-22	145
B.5.	COP BCG 12-40	145
B.6.	COP BCG 12-40	146
B.7.	COP BCG 15-70	146
B.8.	COP BCG 15-70	146
B.9.	Pérdidas de carga en bomba de calor 3-12 kW	147
B.10.	Pérdidas de carga en bomba de calor 5-22 kW	147
B.11.	Pérdidas de carga en bomba de calor 12-40 kW	148
B.12.	Pérdidas de carga en bomba de calor 15-70 kW	148
C.1.	Densidad de mezcla de agua con etilenglicol [30]	149
C.2.	Calor específico de mezcla de agua con etilenglicol [30]	150
C.3.	Viscosidad de mezcla de agua con etilenglicol [30]	151
D.1.	Ficha técnica radiadores JAGA - Altura 035 [38]	152
D.2.	[38]	153
D.3.	Bomba circuladora para vivienda [2]	154
D.4.	Bomba circuladora para red de distribución y red geotermia [2]	155
D.5.	Tarifas Tuberías Ecoflex para red principal [57]	156
D.6.	Tarifas Tuberías Ecoflex para red principal [57]	157
D.7.	Tarifas Tuberías Ecoflex para conexión a vivienda [57]	157
D.8.	Sondas para sistemas de captación cerrados [33]	158
D.9.	Tarifas BCG 2020 [26]	159
D.10.	Vaso de expansión para sistemas de climatización [2]	160
D.11.	Estanque de inercia	160
D.12.	Intercambiador de placas planas	161
D.13.	Servicio de movimiento de tierras. Valor por m^3	161
D.14.	Servicio de perforación	162

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Uno de los principales problemas energéticos de la región de Aysén es la contaminación debido al uso permanente de leña como medio de calefacción, por lo que es necesario evaluar la implementación de tecnologías más limpias para la obtención de calor y que permita cumplir con la demanda energética durante todo el año.

Es aquí donde se propone como solución la energía geotérmica de muy baja entalpía, una energía renovable que aprovecha la capacidad que tiene la tierra para acumular calor y mantener una temperatura constante a bajas profundidades durante todo el año. Con esta energía es posible crear una red de distribución para generar un sistema de calefacción distrital donde a partir de un foco energético se abastece de energía a una serie de viviendas.

Dentro de las condiciones ideales para usar esta tecnología se encuentra el acceso a aguas subterráneas y que exista una demanda en calefacción que justifique la implementación, una de las localidades de la región que cumple con las condiciones para el uso de bombas de calor es Cochrane, una comuna de la región de Aysén compuesta por 1771 viviendas y que será la localidad en estudio de esta memoria.

Esta propuesta está alineada con la visión estratégica de la política energética para la región de Aysén [13], la cual establece que: “En 2050, la Región de Aysén cuenta con un sistema energético sustentable, diversificado y competitivo. Los habitantes disponen de energía en forma equitativa y confiable, lo que promueve su calidad de vida y el desarrollo regional sustentable. Se potencia el ahorro energético y la autogeneración con ERNC, la energía se usa eficientemente y las personas respiran aire limpio.”

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un estudio de factibilidad técnico-económico para la implementación de un sistema de calefacción distrital con geotermia de muy baja entalpía en la localidad de Cochrane.

1.2.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Establecer los fundamentos teóricos y metodológicos asociados a la calefacción distrital utilizando geotermia con distintos tipos de tecnologías
- Evaluar la demanda en calefacción
- Evaluar y diseñar el proceso de generación y distribución de energía
- Realizar una evaluación económica para comparar entre distintas tecnologías de calefacción y generación.

1.3. Alcances

Dentro de los alcances de esta memoria, se consideran viviendas nuevas ubicadas en Cochrane, región de Aysén. Para lo cual se estudia la superficie y distribución típica de viviendas de la zona, pero materialidad requerida según reglamentación de instalaciones energéticamente eficientes.

Para el estudio de demanda energética se evaluarán las condiciones climatológicas promedio de cada hora para cada mes de 1 año y a partir de esto se calculará las cargas térmicas en calefacción. Además, se considera un factor de cumplimiento de la demanda de 0,95. Con los datos que se obtengan se evaluarán 2 tecnologías de calefacción: suelo radiante y radiador de baja temperatura.

El sistema distrital contempla la distribución a baja escala para abastecer a un condominio o villa de hasta 50 viviendas. A nivel técnico, se determinará los largos de cañería con sus diámetros y caudal, pérdidas de carga y temperatura y distribución espacial, se excluye de la memoria aspectos civiles. Además, dado que las distintas tecnologías de calefacción pueden usar fluidos caloportadores a temperaturas diferentes, se evalúa la producción a 35 y 55 °C.

Con respecto al uso de geotermia como fuente de generación de calor, se considera el uso directo de la geotermia con bombas de calor como tecnología, y la evaluación de 5 sistemas de extracción de calor: sistema vertical abierto, vertical cerrado (simple y doble) y horizontal (simple y slinky).

Para los 5 sistemas se dimensionará para encontrar los caudales necesarios, largos, diámetros y pérdidas de carga. Así como también materiales y equipos principales. Para estudiar

el efecto del número de viviendas a nivel distrital se tiene que el rango de estudio para los casos verticales es 20, 30, 40 y 50 viviendas mientras que para los sistemas horizontales serán de 5, 10, 15 y 20 viviendas.

Para la evaluación del recurso geotérmico no se realizarán estudios de suelo ni sondajes, se limitará al estudio de bibliografía para determinar la temperatura del suelo en los estratos superiores de la tierra, según zona, tipo de suelo, profundidad y condiciones climatológicas. Así mismo, para estimar el caudal extraíble de aguas subterráneas se considera casos de estudio de localidades aledañas.

Con respecto al análisis económico, este se limitará al cálculo del costo nivelado de energía asumiendo un proyecto de 30 años de vida para poder comparar entre los distintos casos de este estudio, así como también comparar con otros recursos energéticos.

Capítulo 2

Antecedentes generales

2.1. Localidad de Cochrane

Cochrane es una comuna chilena, capital de la Provincia Capitán Prat en la Región de Aysén General Carlos Ibáñez del Campo, al año 2017 registra 1771 viviendas y una población de 3490 personas, estando los hogares compuestos en promedio por 2,5 personas. El 81,4 % de la población habita en zona urbana y 18,6 % en zona rural [13].

Según Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), la zona corresponde a zona térmica Sur Extrema (SE) alcanzando demandas en calefacción de hasta 150 [kWh/m^2 año]. En donde más del 80 % de las viviendas de la región de Aysén no posee estándares de aislación térmica adecuados [9] debido a que la mayor parte de las construcciones son antiguas y la normativa que establece la aislación adecuada comienza a regir desde las construcciones hechas en el año 2007.

Para lograr caracterizar las viviendas, se realiza estudio en observatorio del MINVU [24], donde se establece que para la comuna de Cochrane el 95,7 % de las viviendas son tipo casa, cuya materialidad predominante es madera (94 %) y la mayor cantidad de viviendas tiene superficies entre 35 a 50 m^2 (38 %), seguidas de las viviendas de entre 50 a 70 m^2 (22,6 %).

Dentro de las viviendas tipo casa, éstas pueden estar aisladas, pareadas o en fila tal como se muestra en la figura, en donde las viviendas aisladas no comparten ningún muro con otras viviendas por lo que las pérdidas de calor se producen en todas las fachadas. Mientras que en las casas pareadas, 1 de las caras no se encuentra expuesta a pérdidas con el exterior y en las viviendas en fila, las viviendas centrales sólo tienen pérdidas en 2 de las 4 fachadas.

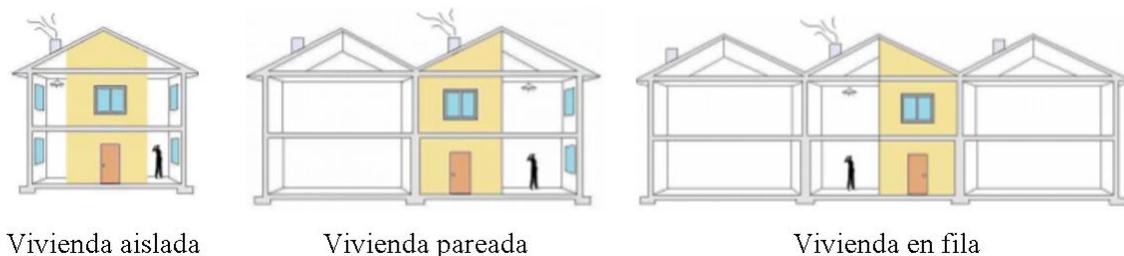


Figura 2.1: Tipos de vivienda [42]

Para la zona de estudio, las viviendas predominantes son las casas aisladas con un 4,4 %, seguidas por las viviendas pareadas con un 1,4 % [12]. Por lo que se decide realizar el estudio considerando casas aisladas.

Por otro lado, considerando que las viviendas antiguas no cumplen con estándares mínimos de aislación, se considerará como vivienda tipo casas energéticamente eficientes por construir, manteniendo superficie predominante.

2.2. Situación actual

Actualmente, los habitantes se calefaccionan utilizando leña como combustible, cuyo mercado se caracteriza por ser mayoritariamente informal. Su precio varía entre los 25.000-40.000 $\$/m^3$, dependiendo si la compra es formal o informal.

Según datos de IDE y del portal de leña del Sistema Nacional de Certificación de Leña, no existe registro de proveedores certificados de leña en la comuna [31]. La leña de compra informal suele ser húmeda, que es menos eficiente térmicamente y además más contaminante.

En efecto, en el monitoreo de las emisiones MP2,5 y MP10 en Cochrane se evidencia que en los meses de invierno se sobrepasa el límite establecido por la norma [7], esto ocurre principalmente debido a que la ciudad se encuentra en un valle y que las bajas temperaturas de invierno provocan un fenómeno de inversión térmica, donde quedan atrapados los contaminantes debido a la combustión de leña en una capa de aire frío superior, sin posibilidad de dispersión por las bajas velocidades de viento.

Monitoreo discreto MP10 Cochrane
2017, 2018, 2019

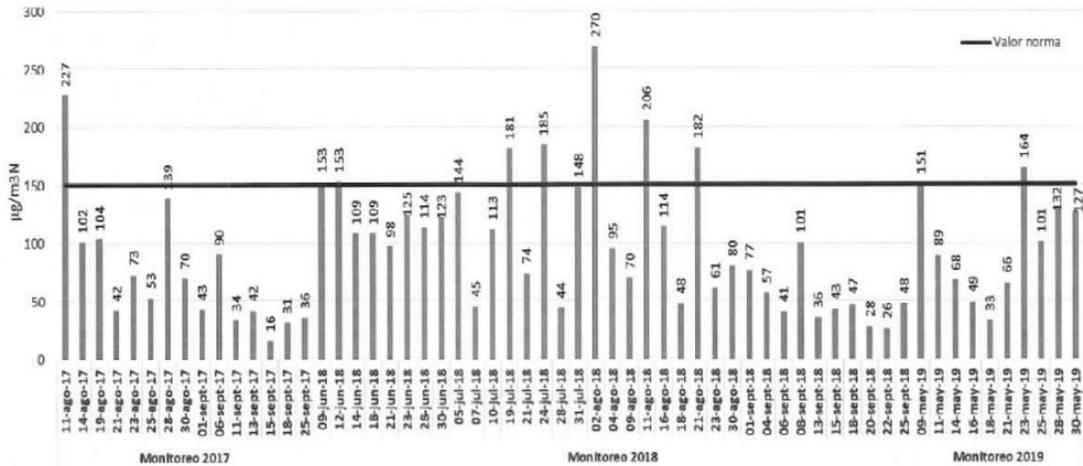


Figura 2.2: Emisiones MP10 en Cochrane

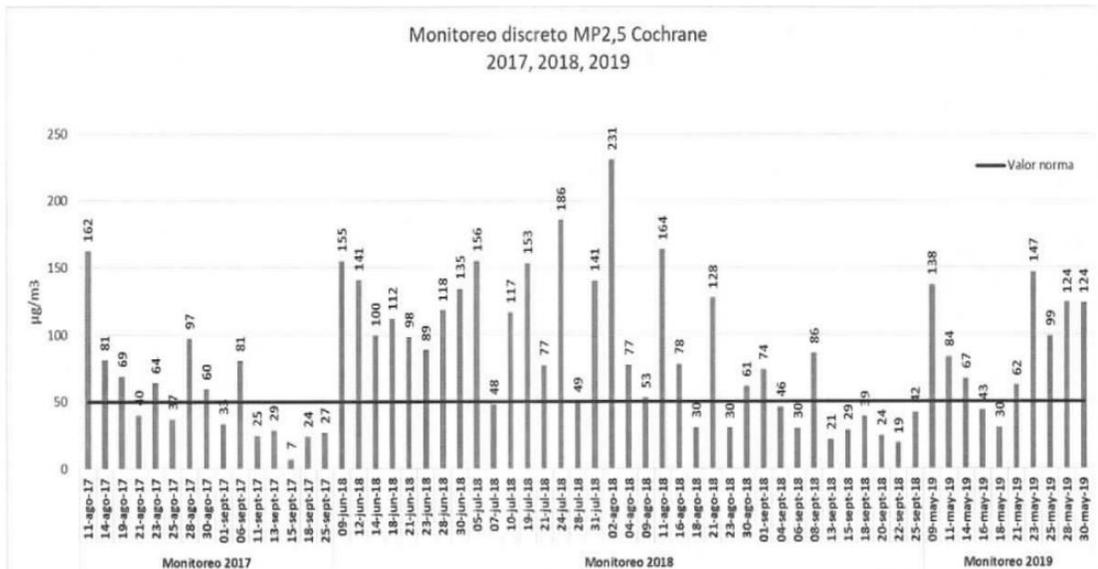


Figura 2.3: Emisiones MP2.5 en Cochrane

El promedio de consumo anual de leña por vivienda es de $23,24 [m^3]$ de leña, equivalente a un costo anual de \$ 527.711 [31], es decir, la calefacción significa un gasto mensual promedio de \$43.980 para cada familia.

Además, los datos cualitativos generados en terreno por un estudio de calefacción en la ciudad [31] indican que existe un 42% de la comunidad de Cochrane que por motivos económicos no es capaz de calefaccionarse de manera constante y segura pues limita su uso.

2.3. Solución propuesta

Debido a los problemas actuales que se tiene en materia de calefacción, se vuelve necesario evaluar otros sistemas de calefacción que permitan disminuir las emisiones, que sea un recurso limpio, seguro y que permita combatir la pobreza energética.

A diferencia de los sistemas convencionales de calefacción, en donde cada edificación cuenta con un sistema propio para generar agua caliente o climatizar, en un sistema de energía distrital la generación de energía se realiza de manera centralizada, y luego es repartida a las viviendas través de un sistema de cañerías. Esta centralización de la generación de energía permite el uso eficiente de energías renovables, un control más estricto sobre las emisiones y la optimización de la operación de acuerdo a las características de los usuarios [41].

Dentro de los beneficios de la calefacción distrital se encuentran [22]:

- **Ambientales:** las emisiones de una central de generación son más fáciles de controlar que aquellas generadas por usuarios individuales, además en un sistema distrital se cuenta con equipos de mejor calidad, eficiencias estacionales, mayor nivel de mantenimiento y menos pérdidas de calor.
- **Económicos:** el precio de la energía térmica generada por una calefacción distrital es competitivo versus fuentes convencionales, especialmente cuando la energía térmica se obtiene utilizando calor residual, o cuando se utilizan sistemas de baja temperatura, como bombas de calor.
- **Mejoramiento de calidad del aire:** en el caso residencial, existe además una importante mejora en la calidad del aire interior, ya que no existe combustión ni emisión de gases contaminantes dentro de la vivienda, eliminando cualquier posible riesgo de intoxicación.
- **Economía verde:** permite utilizar de manera limpia y eficiente los recursos renovables existentes en las regiones, potenciando así las economías locales, creando empleos e ingresos a nivel local.

Por otro lado, para escoger el recurso energético a emplear se opta por la energía geotérmica por sobre otras tecnologías pues se mantiene constante a lo largo del año, lo cual es esencial dada la ubicación extrema de la localidad.

La geotermia es aquella energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie de la tierra. Engloba el calor almacenado en suelos, rocas, aguas subterráneas cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia. Dentro de los beneficios que tiene la geotermia es que es una energía limpia, renovable y eficiente. Además es continua y se puede aprovechar en cualquier lugar, permitiendo reducir las emisiones con costos de explotación reducidos.

Para obtenerla se requiere de sistemas que permitan captarla o cederla como consecuencia del salto térmico entre el terreno y el fluido caloportador. Otra posibilidad es extraer las aguas subterráneas y aprovechar su temperatura. Además, se requiere de una bomba de calor, que es

un equipo térmico que utiliza el ciclo frigorífico de un refrigerante para, mediante un circuito cerrado, absorber calor de un foco caliente y cederlo a un foco frío.

2.3.1. Casos en Chile

Los sistemas de calefacción con geotermia ya se han implementado en Chile, a continuación se presentan 2 casos que servirán de referencia para el estudio:

Condominio Frankfurt [48]

En el año 2009 se construyó el proyecto inmobiliario Condominio Frankfurt calefaccionado mediante un sistema geotérmico distrital. Este proyecto se compone por 34 viviendas de $146 [m^2]$, las cuales cuentan con calefacción y agua caliente sanitaria.

El sistema de extracción cuenta con 2 bombas de calor y un largo de tubería de $300 [m]$, abarcando así una superficie total de $5650 [m^2]$. El proceso comienza con la extracción de agua en un pozo profundo de succión a $13^\circ C$ y reinyección a $8^\circ C$, tras el paso por la bomba de calor se logra producir agua a $40^\circ C$ con un retorno de $35^\circ C$. Durante este proceso, se mantiene una temperatura de calefacción en las viviendas de $20^\circ C$.

Este proyecto cuenta con una potencia térmica instalada de $140 [kW_{th}]$ y una demanda energética de $27 [kW/m^2]$ por vivienda, lo cual equivale a un consumo 12 veces menor respecto a las viviendas promedio existentes en la ciudad de Temuco.

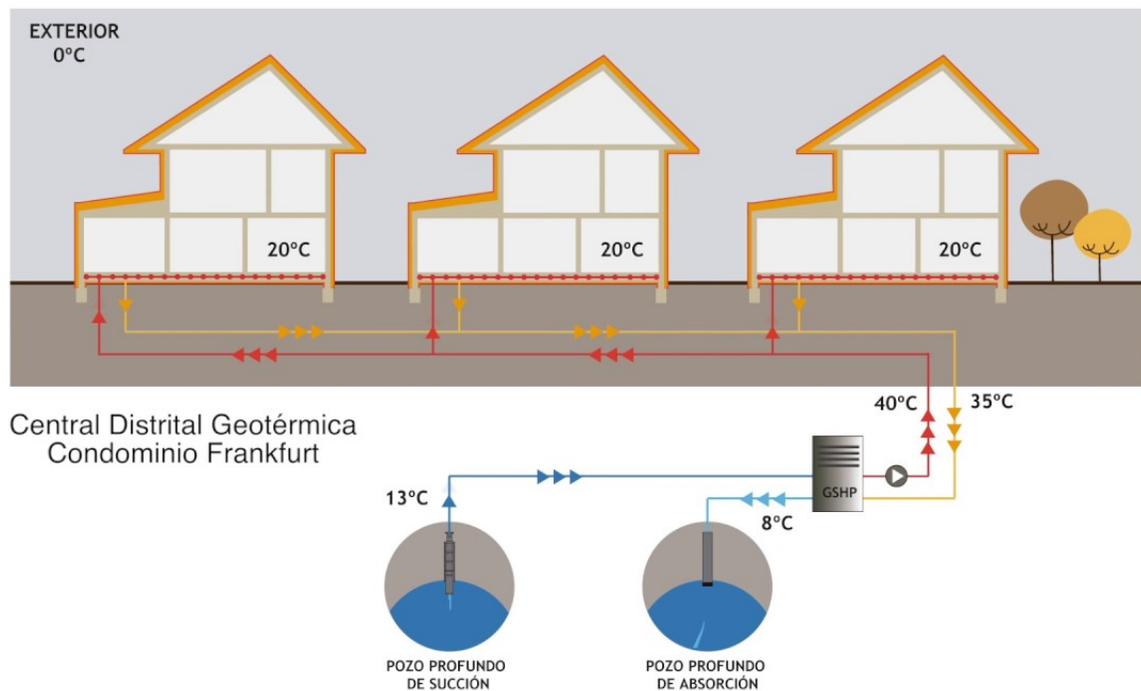


Figura 2.4: Condominio Frankfurt en Temuco [27]

Colegio Coyhaique

Otro caso se desarrolla en la ciudad de Coyhaique, el proyecto de calefacción geotérmica para el establecimiento educacional “Liceo Altos de Mackay” con más de 400 estudiantes. Este proyecto financiado a través del Fondo de Innovación y Competitividad (FIC) calefacciona 11 salas lo que se traduce en aproximadamente 600 [m²] [44].

El método de extracción también es por pozo captando aguas subterráneas, se utilizan 2 bombas de calor de la marca Ecoforest, un estanque de inercia de 1500 L y radiadores y fan coil para calefaccionar. En la imagen de a continuación se muestra el sistema de generación:

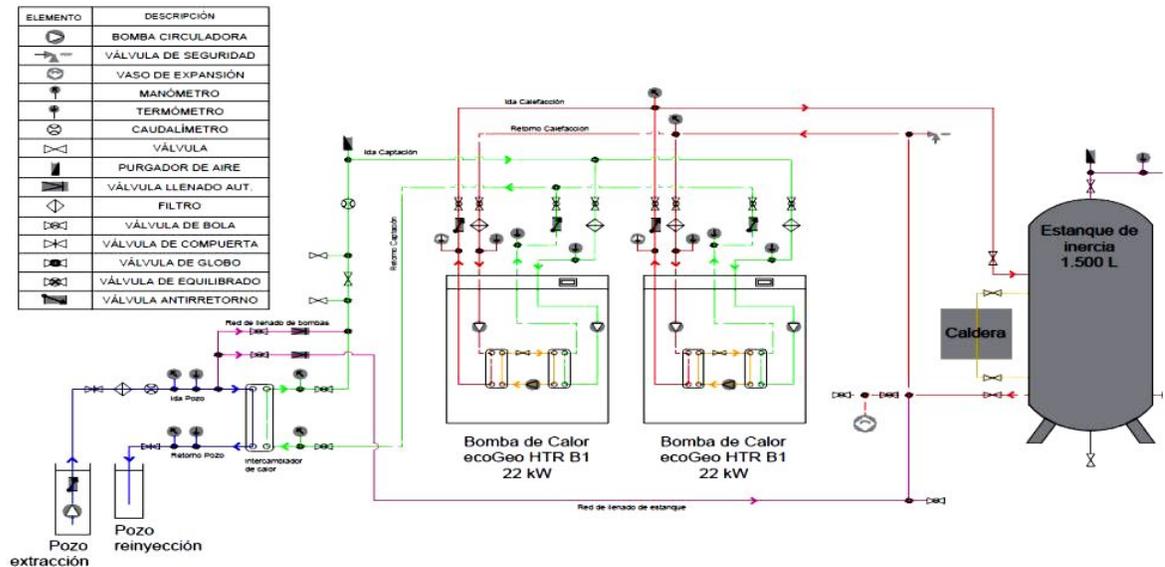


Figura 2.5: Sistema de extracción en colegio de Coyhaique [44]

2.4. Disponibilidad de terreno

Para llevar a cabo un proyecto es necesario identificar la disponibilidad de terreno para tener presente las limitaciones de espacio si es que las hay, debido a que se debe considerar el espacio requerido por las viviendas y el espacio requerido por el sistema de captación en base a geotermia.

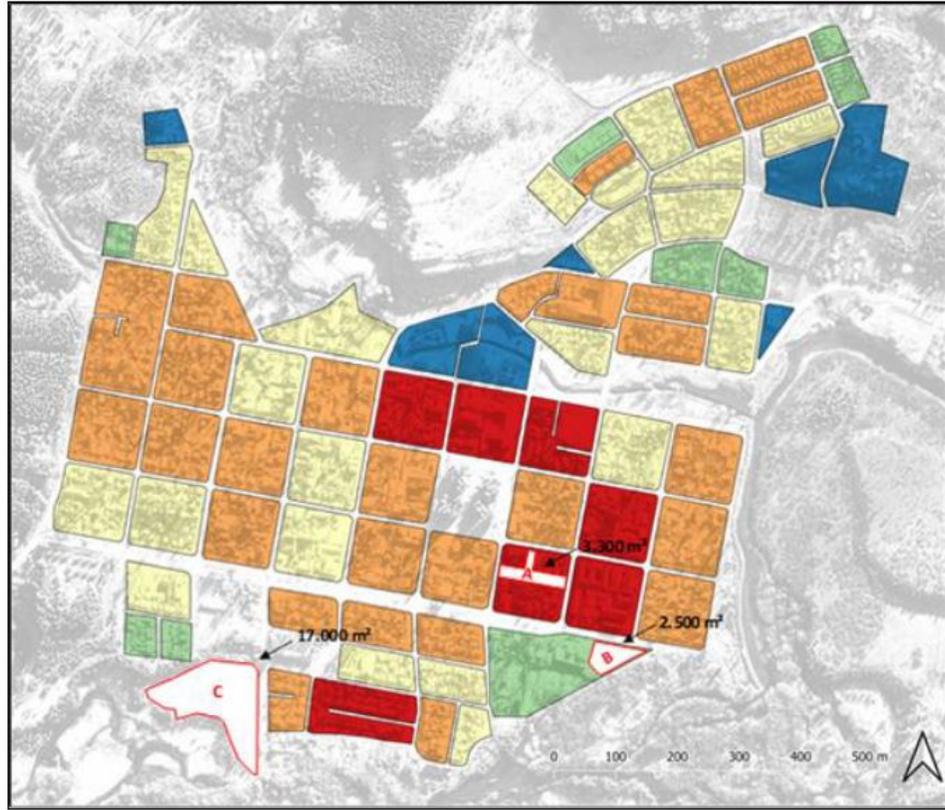


Figura 2.6: Disponibilidad de terrenos

En la figura 2.6 es posible notar que se dispone de aproximadamente 17.000 $[m^2]$ dentro de la ciudad, sin embargo, de requerirse más terreno para el proyecto, éste se podría localizar a las afueras de la ciudad.

Además, según estudio de factibilidad de un sistema de calefacción distrital a toda la ciudad de Cochran [31], en términos de la normativa, según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, el sitio cuenta con la factibilidad para emplear un proyecto de generación de energía térmica en dicho espacio.

Capítulo 3

Marco teórico

Un sistema de calefacción distrital se puede dividir en 3 grandes componentes: central de generación, red de distribución y consumidores.

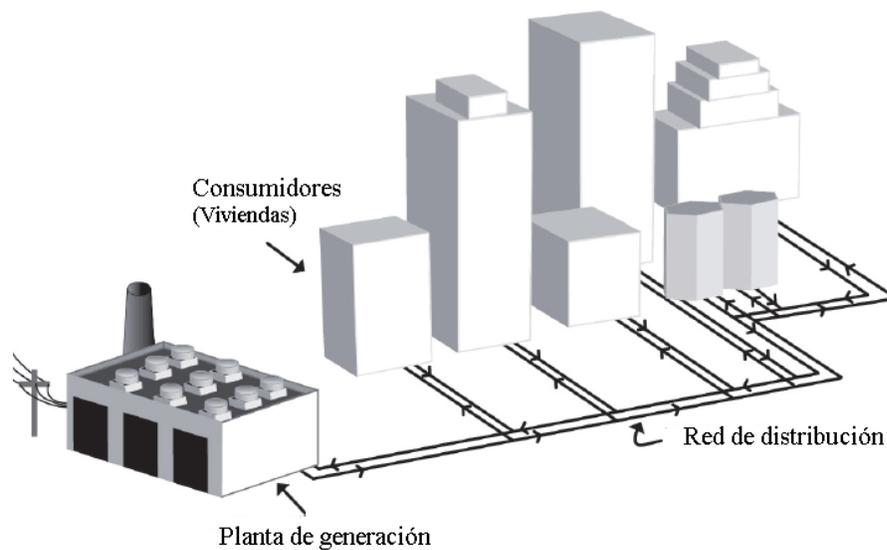


Figura 3.1: Esquema general de sistema de calefacción distrital [41]

A pesar de que el flujo energético se desarrolla de izquierda a derecha, para dimensionarlo se debe comenzar calculando la demanda energética de cada vivienda, luego evaluar cómo distribuir esta energía junto con las pérdidas asociadas a la distribución, para finalmente dimensionar la planta de generación según los requerimientos del conjunto habitacional y la red de distribución.

A continuación se presenta el marco teórico asociado a estas 3 etapas en donde se incluyen los fundamentos teóricos y las ecuaciones a utilizar para el dimensionamiento del sistema:

3.1. Vivienda

Para dimensionar un sistema de calefacción en viviendas se debe calcular las cargas térmicas para posteriormente escoger la tecnología con que se calefaccionará:

3.1.1. Cargas térmicas

La vivienda y sus elementos constructivos, en su interacción con el medio ambiente, se someten a una serie de fenómenos de transferencia, captación y almacenamiento de calor. La **carga térmica** corresponde a la cantidad de energía térmica por unidad de tiempo requerida por un recinto cerrado que intercambia calor con el exterior debido a diferentes condiciones higrotérmicas del interior y del exterior.

Por lo que para identificar la carga en calefacción de una vivienda se debe realizar el cálculo de la carga térmica considerando cargas por transmisión (Q_t), cargas por ventilación e infiltraciones (Q_v), ganancias solares (Q_s) y ganancias internas por equipos y personas (Q_i).

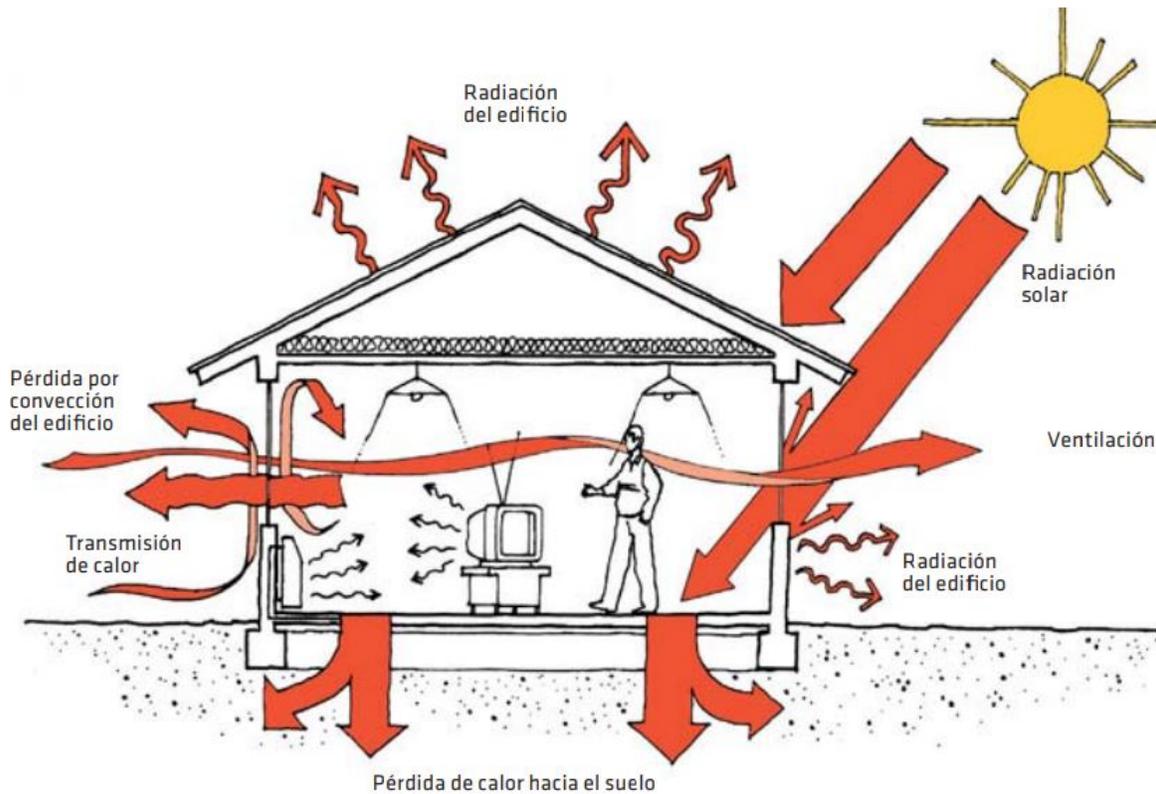


Figura 3.2: Mecanismos de transferencia de calor en la vivienda [8]

Entonces, la carga térmica total de una vivienda para calefacción corresponde a:

$$Q_{calefacción} = Q_t + Q_v - Q_s - Q_i \quad [W] \quad (3.1)$$

Con respecto a las cargas de transmisión y ventilación, éstas dependen de la diferencia de temperatura entre la temperatura de confort y la temperatura exterior ambiental. Se entiende por **confort térmico** el estado mental en que se tiene percepción de agrado en relación a las condiciones ambientales en donde se habita, lo cual tiene relación principal con la temperatura y humedad presentes en el ambiente.

El rango de confort se extiende de alrededor de 20°C en invierno a alrededor de 24°C en verano y humedad relativa del aire entre los 30 a 40 % como mínimo y 60 a 70 % como máximo [58]. Se considerará como criterio el siguiente [42]:

$$T_{confort} = \begin{cases} 20[^\circ\text{C}] & \text{si } T_{amb} < 20[^\circ\text{C}] \\ T_{amb} & \text{si } 20[^\circ\text{C}] < T_{amb} < 24[^\circ\text{C}] \\ 24[^\circ\text{C}] & \text{si } T_{amb} > 24[^\circ\text{C}] \end{cases} \quad (3.2)$$

Por otro lado, al evaluar un proceso de intercambio de calor es importante comprender los conceptos de transmitancia y resistencia térmica [19]:

- **Resistencia térmica:** es una propiedad física de los materiales que mide su capacidad de oponerse a un flujo de calor y se expresa en $[m^2K/W]$.
- **Transmitancia térmica:** es la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras plano-paralelas cuando entre dichas caras hay un gradiente térmico unidad. Se expresa en $[W/m^2K]$.

A continuación se detallan los fundamentos teóricos y ecuaciones para el cálculo de las cargas térmicas, determinadas según guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social [8]:

3.1.1.1. Cargas por transmisión

Las cargas por transmisión (Q_t) contienen todas las pérdidas o ganancias de calor asociadas a la conducción y convección a través de la envolvente de la vivienda:

$$Q_t = \sum_j (U \cdot A)_j \Delta T \quad [W] \quad (3.3)$$

Donde ΔT es la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de confort y $(U \cdot A)_j$ corresponde a la transmitancia de un elemento j con su área respectiva. Se considerará como elementos los muros, ventanas, puertas, techos y cerramientos del piso.

$$Q_c = (U_m A_m + U_v A_v + U_t A_t + U_{pu} A_{pu} + U_p A_p + k_p P_p) \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3.4)$$

Donde U_m y A_m corresponde a la transmitancia y área de muros respectivamente, U_v y A_v de ventanas, U_t y A_t del techo, U_p y A_p del piso, U_{pu} y A_{pu} de las puertas y el producto de $k_p \cdot P_p$ es la pérdida por transmisión de calor perimetral en el piso.

Los valores de transmitancia recomendado para viviendas energéticamente eficientes en Chile según zona térmica y tipo de elemento constructivo son:

ZONA TÉRMICA ²	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Techos	0,84	0,47	0,47	0,38	0,33	0,28	0,28	0,25	0,25
Muros	2,10	0,80	0,80	0,80	0,60	0,45	0,40	0,30	0,35
Pisos ventilados	3,60	0,70	0,87	0,70	0,60	0,50	0,39	0,32	0,32
Pisos sobre terreno -R100 [(m ² K)/W]*100	--	45	45	45	45	91	91	91	91
Puertas	--	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Ventanas	5.8	3.6	3.6	3.6	3.0	3.0	2.4	2.4	2.4

Figura 3.3: Valores recomendados de transmitancia térmica [23]

Además, el porcentaje máximo de superficie vidriada es:

ZONA TÉRMICA	N	S	E-O
A	50%	40%	30%
B	60%	60%	40%
C	50%	50%	40%
D	50%	40%	30%
E	50%	40%	30%
F	50%	35%	25%
G	40%	30%	15%
H	30%	10%	10%
I	30%	10%	10%

Figura 3.4: Porcentaje máximo de superficie vidriada por orientación según zona térmica [23]

3.1.1.2. Cargas por ventilación e infiltraciones

Las ganancias o pérdidas térmicas por renovación de aire al interior de la vivienda por el aire exterior (Q_v) se puede determinar con:

$$Q_v = \rho_a \cdot c_p \cdot \dot{V} \Delta T \quad [W] \quad (3.5)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire y \dot{V} corresponde al flujo volumétrico del aire que se renueva en $[m^3/s]$ y para determinarlo se considera el concepto de ACH que indica el número de renovaciones completas de aire por hora $[1/h]$ y el volumen interno de la vivienda $V_v[m^3]$:

$$\dot{V} = \frac{ACH \cdot V_v}{3600} \quad [m^3/s] \quad (3.6)$$

Los valores de ACH recomendado según la zona climática son [42]:

Tabla 3.1: Renovaciones de aire para las distintas zonas climáticas

Zona climática	Renovaciones de aire ACH [1/h]
Norte Litoral	4
Norte Desértica	2
Norte Valles Transversales	2,5
Central Litoral	3
Central Interior	3
Sur Litoral	3
Sur Interior	2,5
Sur Extrema	2
Andina	2

Otro criterio de diseño de las renovaciones de aire por hora (ACH) es considerar el término USO [4]:

$$ACH = 0,2 + 0,2 \cdot USO \quad (3.7)$$

Donde el término USO es 1 o 0, dependiendo del horario del día. Para los horarios donde las personas se encuentran en la vivienda, el término toma el valor de 1 y para los horarios donde está vacía, el valor es 0. Esto porque se toma en consideración el aumento de infiltraciones que ocurre cuando las personas se encuentran en la casa, ya sea por apertura de puertas o ventanas

3.1.1.3. Ganancias solares

Las ganancias solares corresponden a ganancias térmicas por radiación debido a la irradiancia solar. La captación solar en la vivienda se realiza a través de los elementos de la envolvente, principalmente elementos vidriados. La cantidad de calor captado y la forma de transmisión hacia el interior, va a estar determinada por las propiedades de los elementos de la envolvente y el nivel de sombra al que estará expuesta la vivienda.

Entonces las cargas solares (Q_s) se dividen en 2 componentes: la ganancia solar por elementos opacos (Q_{so}) como muros, puertas y techos y ganancias debido a elementos translúcidos (Q_{sv}) como vidrios.

$$Q_s = Q_{so} + Q_{sv} \quad [W] \quad (3.8)$$

En primer lugar, se definen algunos conceptos asociados a las ganancias térmicas debido a radiación [51]:

- **Absortividad:** en general los cuerpos que reciben radiación no absorben toda la potencia perfectamente, sino solamente una parte. La proporción de la radiación total que un cuerpo absorbe es la absorbitividad α .
- **Transmisividad:** es la proporción de la radiación que incide sobre un cuerpo y que acaba transmitiéndose a través de él sin ser absorbida ni reflejada. Los cuerpos opacos tienen una transmisividad τ efectivamente nula. Por lo que este factor será relevante al evaluar las ganancias de elementos translúcidos.
- **Emisividad:** es una medida de la radiación que emite un cuerpo en comparación con lo que emitiría un cuerpo negro.
- **Reflectividad:** es la proporción de la radiación que el cuerpo refleja.

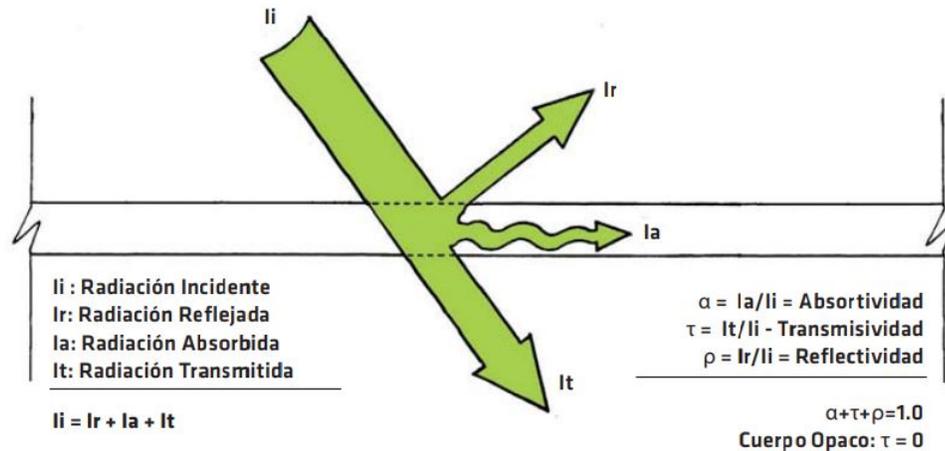


Figura 3.5: Conceptos de absorptividad, transmisividad y reflectividad [8]

Ganancias solares por elementos translúcidos

En elementos vidriados la ganancia solar se produce dada la transmisividad alta que presentan estos materiales ante la radiación directa del sol. Para calcular esta ganancia se utiliza la guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social [8]:

$$Q_{sv} = \sum_j \tau \cdot A_{v,j} \cdot I_j \cdot (1 - FS) \cdot FM \quad [W] \quad (3.9)$$

Donde τ es la transmisividad de superficies translúcidas, FM es el porcentaje de vidrio con respecto al vano completo y para marcos de madera su valor es de $FM=0,75$, $A_{v,j}$ es el área de superficie translúcida [m^2] en la dirección j , I_j es la irradiancia solar que impacta en la vertical dirección j [W/m^2] y FS es el factor de sombra del vidrio que se determina según:

$$FS = CS \cdot 0,87 \quad (3.10)$$

Donde CS corresponde al coeficiente de sombra, los valores por defecto para vidrios claros es de CS=1 mientras que CS=0,89 para los de doble vidriado (DVH).

Ganancias solares por elementos opacos

En elementos opacos, el flujo medio captado depende principalmente de la irradiancia solar que impacta en la superficie, de la absorptividad superficial del sistema constructivo y de la transmitancia térmica del mismo. Mientras mayor sea la absorción del material, mayor será la captación de calor.

La ganancia solar por elementos opacos se puede calcular con [8]:

$$Q_{so} = \sum_j \alpha_o \cdot R_{sc} \cdot U_o \cdot A_{o,j} \cdot I_j \cdot (1 - FS) \quad [W] \quad (3.11)$$

Donde α_o es la absorptancia radiativa de la superficie opaca (techo, muro o puerta), I_j irradiancia solar que impacta en la vertical dirección j [W/m^2], U_o transmitancia térmica del elemento opaco [W/m^2K], (1-FS) corresponde al porcentaje de la radiación que efectivamente llega al elemento opaco y R_{sc} es la resistencia térmica de la superficie externa a la absorción de radiación.

La resistencia térmica de la cara externa contiene térmicos convectivos y radiativos, los cuales se pueden determinar según norma ISO 6946 [34]:

$$R_{sc} = \frac{1}{h_c + h_r} \quad \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (3.12)$$

Donde el término convectivo (h_c) cuantifica la influencia del flujo en la transferencia de calor por convección, depende de la velocidad del viento v_s y se puede determinar con [34]:

$$h_c = 4 + 4 \cdot v_v \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.13)$$

Y el término radiativo (h_r) se determina con [34]:

$$h_r = \varepsilon_o \cdot 4 \cdot \sigma \cdot (T_a - T_{sky})^3 \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.14)$$

Donde ε_o es la emisividad de la superficie opaca, se supone un valor medio de 0,5, σ es la constante de Stephan Boltzmann, T_a corresponde a la temperatura ambiente [$^{\circ}K$] y T_{sky} es temperatura del cielo [$^{\circ}K$] que se puede estimar como:

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad [^{\circ}K] \quad (3.15)$$

3.1.1.4. Ganancias internas

Para definir las cargas internas debido a los ocupantes se utiliza la NCh 3308:2013 [20] la cual determina un mínimo de 2 personas por vivienda, más una por cada dormitorio extra. Dichas personas proporcionan una carga sensible de 98,4 [W] durante el día (7:00 a 22:00 horas) y 82 [W] durante la noche (22:00 a 7:00 horas).

Además, se considera una fracción de ocupación según horario debido a que los ocupantes salen de la vivienda para realizar su jornada laboral, educacional, entre otros [23] que será aplicado a todos los días del año:

Tabla 3.2: Fracción de ocupación en las viviendas de Chile

Horario desde-hasta	Fracción de ocupación
00:00 - 08:00	1
08:00 - 09:00	0,9
09:00 - 10:00	0,4
10:00 - 17:00	0,3
17:00 - 18:00	0,5
18:00 - 22:00	0,9
22:00 - 24:00	1

Por otro lado, las cargas debido a iluminación se pueden aproximar como 1,5 [W/ m^2] dentro del horario de 7:00 a 21:00 horas (ambas incluidas). Los electrodomésticos tienen cargas de 1,7 [W/ m^2] en el mismo horario.

3.1.2. Sistema de calefacción

Una vez que se calculan las cargas térmicas de una vivienda se puede diseñar un sistema de calefacción escogiendo entre distintas tecnologías. En este estudio se considera la evaluación de sistema de suelo radiante y radiadores de baja temperatura.

En ambos casos se requiere transportar por tuberías un fluido caliente que puede ser agua o agua con anticongelante. Estos fluidos provienen de la red de distribución y se conectan a los radiadores o sistema de suelo radiante con el objetivo de transferir calor a la vivienda.

3.1.2.1. Suelo radiante

La calefacción con suelo radiante consiste en tuberías instaladas en forma de serpentín bajo toda la superficie del local a calefaccionar bajo una capa de mortero, estas tuberías conducen el agua caliente producida por el sistema de generación y transmitirá calor al suelo y éste transmitirá el calor a la vivienda de manera uniforme. La temperatura media del agua requerida para calefaccionar es de 30-45°C lo cual tiene por beneficio que al trabajar a bajas temperaturas se reducen las pérdidas de calor.

En modo calefacción, la mejora del rendimiento se consigue debido a que el suelo radiante no trabaja a temperaturas tan elevadas como los sistemas clásicos lo cual aumenta el rendi-

miento de los sistemas de generación y esto a su vez repercute en ahorros económicos. Esta característica también hace del suelo radiante un sistema óptimo para trabajar de forma conjunta con instalaciones térmicas que aprovechan energías renovables, como es el caso de la geotermia de baja temperatura.

De entre todos los sistemas existentes de climatización, los sistemas radiantes son los que mejor se ajustan a la emisión óptima de calor del cuerpo humano por radiación, convección, transmisión y evaporación. Distintas investigaciones demuestran que la distribución vertical de la temperatura en una habitación varía como se muestra en la siguiente figura:

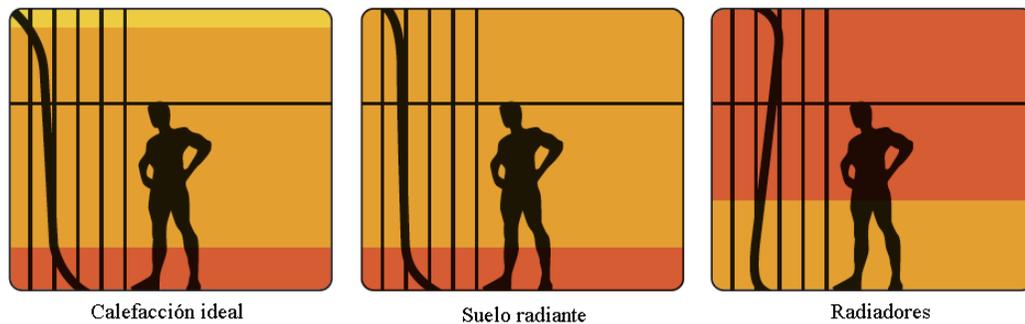


Figura 3.6: Perfil óptimo de temperatura

Entonces, el suelo radiante es el que presenta un perfil de temperatura más cercano al ideal.

Fundamentos térmicos

En primer lugar se presentan los componentes principales del suelo radiante:

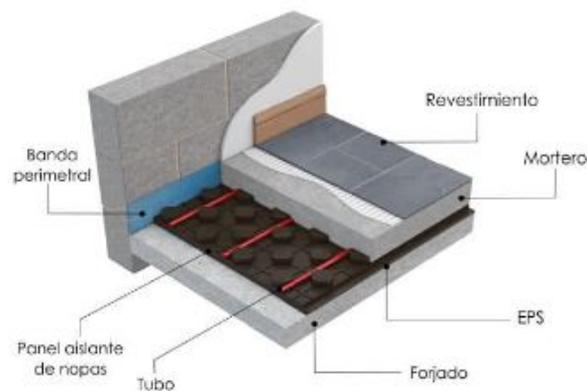


Figura 3.7: Componentes del suelo radiante

Los circuitos se embeben en una capa de mortero de cemento que puede ser tradicional o autonivelante sobre el cual se coloca el revestimiento final, que puede ser cerámico, madera, piedra, etc.

El funcionamiento consiste en que el mortero absorbe el calor disipado por las tuberías y lo transmite al pavimento superior y a su vez, emite esta energía hacia las paredes y techos de la habitación mediante radiación principalmente y en pequeña proporción mediante convección natural.

Para realizar la instalación a la vivienda se debe colocar cinta perimetral para absorber las dilataciones que pueda sufrir el mortero debido al aumento de temperatura o la evaporación del agua que contenga. Además, para evitar el traspaso de humedad entre el suelo y la plancha de aislamiento se coloca un film de polietileno, luego se coloca un panel de aislación con un material de baja conductividad térmica en todas las zonas en donde se instale el piso radiante, con el objetivo de evitar las pérdidas de calor hacia el suelo.

La configuración del circuito de piso radiante debe cumplir con los siguientes requerimientos [55]:

- La distancia entre tuberías en el circuito debe ser constante en toda la instalación, pudiendo ser de entre 15 a 20 [cm]
- Las tuberías de ida y retorno deben colocarse una al lado de la otra en todo el circuito, para homogeneizar la temperatura superficial de la cerámica o piso. Se puede utilizar un trazado en doble serpentín o espiral
- Los circuitos no pueden cruzarse
- Los circuitos de climatización deben tener un largo máximo de 100 a 120 [m]. Para áreas grandes se deben utilizar varios circuitos en paralelo los cuales deben conectarse a un colector hidráulico.

Dentro de las posibles configuraciones se encuentra:

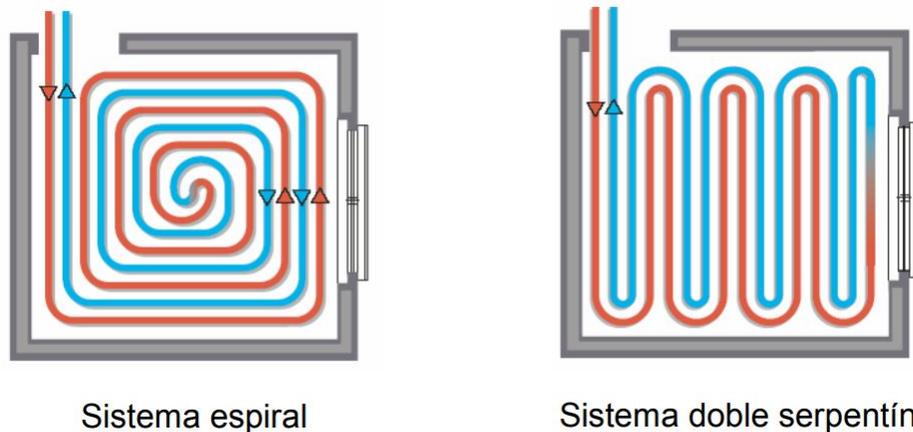


Figura 3.8: Configuraciones de suelo radiante

Un colector hidráulico permite entradas y salidas de tuberías que operan en paralelo, se recomienda ubicarlo en un punto central de la instalación y en un punto más alto que el plano de los circuitos con el objetivo de que se pueda purgar, instalar y controlar con

facilidad. Se instalan dentro de una caja de colectores y por temas estéticos y de accesibilidad se recomienda ubicarlo en armarios o similar.

Se requiere además de una bomba circuladora de caudal variable que permita mantener el caudal requerido y sistemas de control para la regulación del suelo radiante. El esquema de este tipo de sistemas se muestra a continuación:

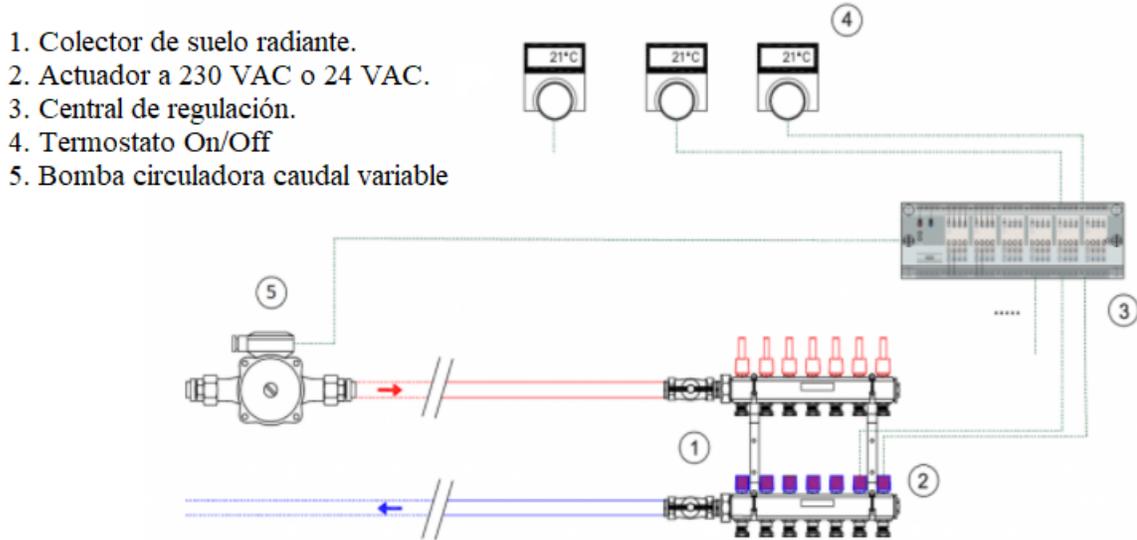


Figura 3.9: Esquema de sistema de control

Dimensionamiento

Tal como se observó en la figura 3.6, en el sistema de suelo radiante las temperaturas más altas se ubican en el suelo que es la fuente de calor de la vivienda y en la parte superior se tiene una temperatura menor correspondiente a la temperatura de confort. Dado que la temperatura máxima se encuentra en el suelo, se debe identificar el flujo de calor máximo permitido por concepto de seguridad.

Entonces, siendo la temperatura de seteo o confort de $T_{set} = 20[^\circ C]$ se establece la temperatura superficial máxima para el suelo en $29^\circ C$ para las zonas definidas como residenciales (zona ocupada), permitiéndose alcanzar $35^\circ C$ en las zonas perimetrales (1 [m] en torno a los cerramientos de cada local) y en los cuartos de baño y cocina [55].

Se debe dimensionar el sistema que establezca un flujo de calor (\dot{q}) menor al flujo máximo (\dot{q}_{max}) asociado a la temperatura máxima:

$$\dot{q}_{max} = 8,29 \cdot (T_{m\acute{a}x,piso} - T_{set})^{1,1} \quad [W/m^2] \quad (3.16)$$

Cuando la separación entre tuberías es menor a 0,375 [m] el flujo de calor por unidad de área (\dot{q}) procedente de éstas se calcula como:

$$\dot{q} = 6,7 \cdot a_B \cdot a_T \cdot a_T^{mT} \cdot a_u^{m_u} \cdot a_D^{m_D} \cdot \left[\frac{T_{imp} - T_{ret}}{\ln \left(\frac{T_{imp} - T_{set}}{T_{ret} - T_{set}} \right)} \right] \quad [W/m^2] \quad (3.17)$$

Donde los valores de a y m son factores adimensionales del sistema, T_{imp} y T_{ret} son las temperaturas de impulsión y retorno del fluido que circula por las tuberías del sistema de losa radiante. Los factores adimensionales se calculan con:

El factor a_B es el factor de revestimiento del suelo, que corresponde a la cerámica y capa de pegamento, piso flotante u otros, y se calcula con:

$$a_B = \frac{0,138}{0,093 + \frac{0,045}{\lambda_r} + R_r} \quad (3.18)$$

donde λ_r es la conductividad térmica del revestimiento [W/mK] y R_r es la resistencia térmica del revestimiento y se puede determinar considerando el espesor e [m]:

$$R_r = \frac{e_r}{\lambda_r} \quad \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (3.19)$$

El coeficiente a_T es el factor de paso, depende de la resistencia del revestimiento R_r y se determina con:

$$a_T = 2 \cdot R_r^2 - 0,94 \cdot R_r + 1,23 \quad (3.20)$$

El factor de recubrimiento a_u depende de la separación entre las tuberías y de la resistencia térmica del revestimiento. Cuando la separación entre las tuberías del circuito es de 15 [cm] se calcula con:

$$a_u = 8,667 \cdot R_r^3 - 1,3 \cdot R_r^2 - 0,1767 \cdot R_r + 1,057 \quad (3.21)$$

El factor a_D también depende de la separación entre las tuberías, la resistencia térmica del revestimiento y del diámetro de las tuberías. Cuando la separación es de 15 [cm] se puede calcular con:

$$a_D = -1,333 \cdot R_r^3 + 0,4 \cdot R_r^2 - 0,1367 \cdot R_r + 1,04 \quad (3.22)$$

Cuando la separación entre las tuberías es de entre 0,05 y 0,375 [m], el factor m_T se obtiene como una función de la separación de las tuberías T [m]:

$$m_T = 1 - \frac{T}{0,075} \quad (3.23)$$

Cuando el espesor de la capa por encima de la tubería es mayor a 0,015 [m] el factor m_u se obtiene como una función de este espesor S_u [m] y se expresa como:

$$m_u = 100 \cdot (0,045 - S_u) \quad (3.24)$$

Finalmente, cuando el diámetro exterior de la tubería D_{ext} mide entre 0,01 y 0,03 [m], el factor m_D se obtiene con:

$$m_D = 250 \cdot (D_{ext} - 0,02) \quad (3.25)$$

Una vez se determine el flujo térmico \dot{q} [W/m^2] se puede determinar el flujo másico necesario para ajustarse a la demanda térmica de la vivienda:

$$\dot{m} = \frac{A_F \cdot \dot{q}}{(T_{imp} - T_{ret}) \cdot c_{p,f}} \cdot \left(1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{T_{set} - T_{inf}}{\dot{q} \cdot R_u} \right) \quad [g/s] \quad (3.26)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico en [g/s], A_F es la superficie del suelo cubierta por el circuito en [m^2], \dot{q} es la densidad de flujo térmico [W/m^2], T_{imp} y T_{ret} las temperaturas de impulsión y retorno del circuito en [$^{\circ}C$], T_{set} y T_{inf} son la temperatura de seteo (confort) y la de la zona inferior de la vivienda en [$^{\circ}C$], $c_{p,f}$ es el calor específico del fluido caloportador en [$kJ/kg^{\circ}C$], R_o y R_u corresponde a las resistencias térmicas sobre y bajo las tuberías respectivamente en [m^2K/W].

El largo total de las tuberías en un circuito se puede estimar considerando la separación entre las tuberías $T[m]$, el área a climatizar por ese circuito [m^2] y la distancia l desde el colector al inicio del circuito:

$$L_t = \frac{A_t}{T} + 2 \cdot l \quad [m] \quad (3.27)$$

3.1.2.2. Radiadores

Los radiadores de calefacción por agua son elementos que emiten calor al ambiente donde estén instalados, por ellos circula el agua procedente del generador de calor cediendo calor por radiación y/o convección, dependiendo de la temperatura del agua, superficie de intercambio y diseño del emisor. Para las instalaciones en base a geotermia se recomienda utilizar radiadores de baja temperatura que aumentan la eficiencia del proceso y requieren agua a una temperatura de hasta 55 $^{\circ}C$ aproximadamente.

La ubicación ideal es bajo la ventana de forma que el aire frío se caliente al pasar sobre el radiador. Así, el aire caliente tiende a subir empujando el aire frío de la zona superior hacia abajo, creándose una convección cíclica que reparte el calor de forma rápida y homogénea [16].

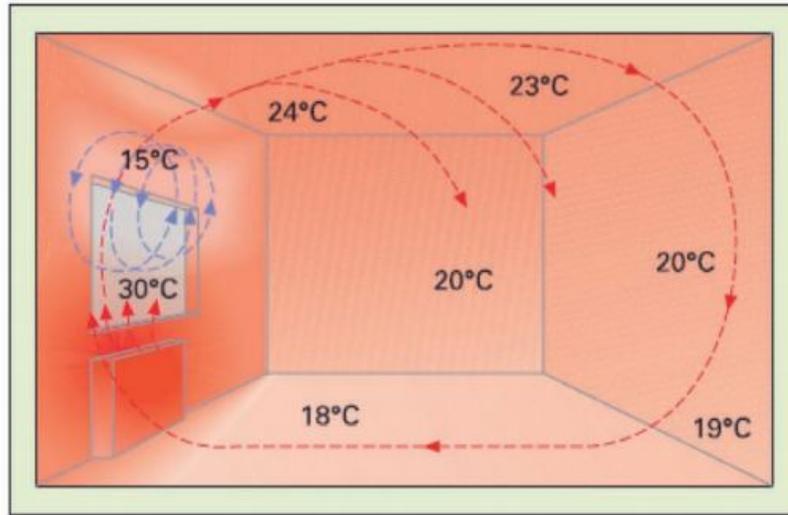


Figura 3.10: Temperaturas en una habitación con radiadores

Es necesario contar con un sistema de control y que la bomba del circuito de calefacción sea de caudal variable, de modo que el sistema de calefacción central pueda adaptar su funcionamiento a las condiciones reales en cada momento.

Tal como se puede observar en la siguiente imagen, un circuito de calefacción con radiadores utiliza una línea de tubería de alimentación de agua caliente y una línea de retorno con agua más fría. Los radiadores se disponen en paralelo.

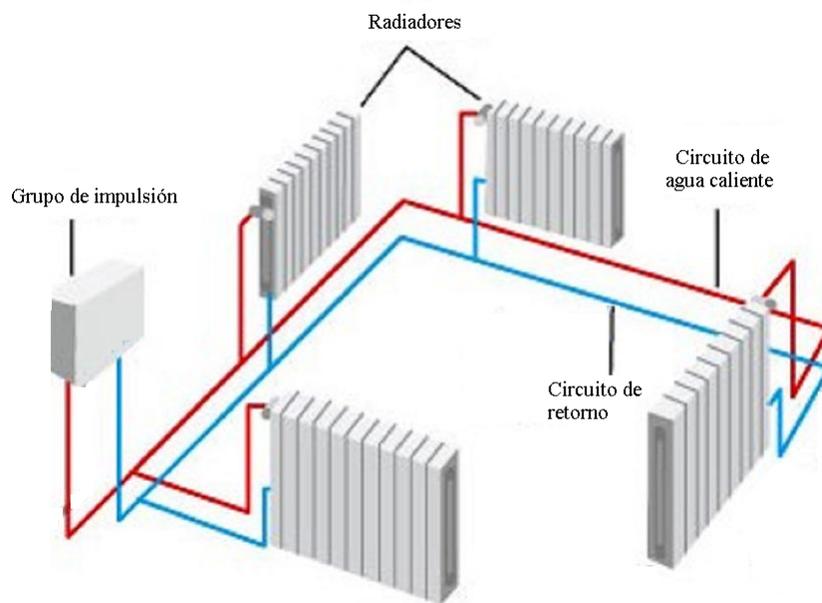


Figura 3.11: Circuito de calefacción con radiadores

Tuberías

Con respecto a las tuberías del circuito se puede utilizar tuberías empotradas a las paredes o suelo o tuberías superficiales. En ambos casos es requerido aislarlas según las condiciones de operación para evitar las pérdidas térmicas. El espesor mínimo recomendado para la aislación de cañerías y accesorios en el interior es:

Tabla 3.3: Espesor de aislamiento en cañerías y accesorios en sistemas interiores de calefacción [21]

Espesor mínimo de aislamiento [mm]				
Diámetro exterior tuberías [in]	Temperatura del fluido [°C]			
	40 a 65	66 a 100	101 a 150	151 a 200
$D < 1 \frac{1}{4}''$	20	20	30	40
$1 \frac{1}{4}'' < D < 2''$	20	30	40	40
$2'' < D < 3''$	30	30	40	50
$3'' < D < 5''$	30	40	50	50
$5'' < D$	30	40	50	60

Con respecto a los materiales a emplear, se puede considerar [47]:

- **Tuberías de cobre:** son de gran resistencia a las altas temperaturas, es un material que no se deteriora fácilmente, conservando sus propiedades con el paso del tiempo, es fácil de moldear y tienen un coste relativamente elevado.
- **Tuberías de polietileno reticulado:** Son tuberías de plástico resistentes a las altas temperaturas y presión.
- **Multicapa:** Estas tuberías para la calefacción están elaboradas con tres capas. Una capa interior y exterior de polietileno y una capa central de aluminio.

En la actualidad las tuberías para calefacción multicapa, han logrado desplazar a las de metal, gracias a su resistencia y fácil instalación. Entre sus ventajas principales destacan:

- **Resistencia y durabilidad:** soportan temperaturas de 95 [°C], teniendo una vida útil de 50 años.
- **Bajo coste:** tienen un coste inferior en comparación a las tuberías de metal y algunas otras tuberías plásticas.
- **Fácil de instalar:** es un material liviano y de fácil instalación. Es flexible y puede adaptarse a cualquier esquina de la habitación y mantener esa curvatura. Sus uniones se realizan mediante press-fitting o mecanizadas.
- **Mínima dilatación:** a diferencia de otras tuberías de plástico para calefacción, la capa de aluminio presente en el tubo disminuye la dilatación ocasionada por las altas temperaturas.

3.1.2.3. Diseño hidráulico

Tanto para el sistema de radiadores como de piso radiante es necesario evaluar el sistema hidráulico, para lo cual se debe calcular las pérdidas de carga, caudal requerido, vaso de expansión y elección de bombas circuladoras.

3.1.2.3.1. Caudal requerido en una instalación térmica

El calor entregado por un fluido puede expresarse como [39]:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3.28)$$

Donde \dot{m} es el caudal másico del fluido en [kg/s], c_p es el calor específico [J/kg °C] y ΔT la caída de temperatura en [°C] o [K]. Entonces, el caudal de agua requerido para entregar una cantidad de calor Q es:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad [kg/s] \quad (3.29)$$

3.1.2.3.2. Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga o presión en un sistema de distribución ocurren en la interfase entre la pared interna de la tubería y el fluido debido a esfuerzos de corte. Para realizar el cálculo de las pérdidas en primer lugar es necesario determinar el tipo de tubería, su largo y diámetro y si el sistema se encuentra en circuito en paralelo, en serie o en una configuración mixta. Además, es necesario identificar irregularidades en la red.

Dentro de las pérdidas de carga se encuentran las pérdidas de carga regulares h_f y singulares h_K , siendo la pérdida de carga total la suma de estos valores:

$$\Delta h_T = h_f + h_K \quad [m.c.a] \quad (3.30)$$

Pérdida de carga regular

Se entiende por pérdida de carga primaria o regular, a la pérdida de carga producida en la tubería por la fricción del fluido con las paredes internas de la misma. Aumenta a medida que aumenta la velocidad del fluido o a medida que disminuye el diámetro interno de la tubería.

$$h_{f,l} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [m.c.a] \quad (3.31)$$

Donde f corresponde al factor de fricción, L es la longitud de la cañería, D el diámetro interno de la cañería, v la velocidad del fluido por la cañería y g la aceleración de gravedad.

El factor de fricción f es un valor adimensional e igual a $64/Re$ para flujo laminar, y para flujo turbulento con rugosidad intermedia se puede determinar con la ecuación de Colebrook

simplificada en donde se condisera el diámetro interno de la tubería D_i , el número de Reynolds Re y la rugosidad de la tubería ε :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_i} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (3.32)$$

Siendo el número de Reynolds igual a:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (3.33)$$

Donde ρ es la densidad [kg/m^3], v la velocidad del fluido en [m/s], D el diámetro interno [m] y μ la viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].

Pérdida de carga secundaria

Pérdida de carga secundaria, singular o local, es la pérdida de carga producida en accesorios que existan en la tubería. Los accesorios pueden ser acoples, niples, codos, llaves o válvulas, "T", ampliaciones (gradual o brusca), reducciones (gradual o brusca), uniones, entre otras. Para el cálculo se considera la constante de pérdida en la singularidad: K .

$$h_K = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [m.c.a] \quad (3.34)$$

Algunos valores para la constante K:

Tabla 3.4: Valor K en accesorios [43]

	Valor k
Válvulas bola	0,051
Válvula retención	2
Válvula compuerta	0,15
Conexión T	1,8
Codo 90°	0,75
Codo 180° rosca	1,5
Codo 180° embreado	0,2

Además, tal como se mencionó antes, las pérdidas de carga totales serán distintas en circuitos en serie o paralelo:

Circuitos en paralelo

Un sistema de tuberías en paralelo está formado por un conjunto de tuberías que se originan en un mismo punto inicial y terminan en un único punto final.

Para un sistema general de n tuberías en paralelo se verifica que el caudal total del sistema Q_T , es la suma de los caudales individuales de cada una de las tuberías (ecuación de continuidad).

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (3.35)$$

La pérdida de carga total del sistema es igual a la pérdida de carga evaluada en una tubería cualquiera cuando la configuración es simétrica. Esta pérdida de carga, es un valor constante en cada una de las tuberías del sistema, es decir la pérdida de carga individual (h_i) de cualquier tubería del sistema es igual a la pérdida de carga total del sistema (h_T):

$$\Delta h_T = h_i = h_{f_i} + h_{m_i} \quad [m.c.a] \quad (3.36)$$

En un sistema no simétrico en paralelo, la pérdida de carga total será igual a la pérdida de carga total del circuito más desfavorable.

Circuitos en serie

En circuitos en serie, la pérdida de carga total será la suma de las pérdidas de carga en cada segmento de la tubería. El caudal es el mismo para cada elemento de un circuito en serie.

$$Q_T = Q_i = Q_1 = Q_2 = \dots + Q_n \quad (3.37)$$

$$h_T = \sum_{i=1}^n h_i = h_1 + h_2 + \dots + h_n \quad [m.c.a] \quad (3.38)$$

3.1.2.3.3. Bombas circuladoras

Dado que el principio de funcionamiento de todas las instalaciones térmicas en estudio se debe al movimiento de fluidos caloportadores, es necesario instalar bombas de circulación según las condiciones de operación necesarias.

Para el dimensionamiento, los valores más importantes a considerar son el caudal que se puede calcular con la ecuación 3.29 y además, la elevación o altura total requerida [4]:

$$h_{req} = \frac{P_f - P_i}{\rho_f \cdot g} + \frac{V_f^2 - V_i^2}{2g} + z_f - z_i + h_T \quad [m.c.a] \quad (3.39)$$

Donde h_{req} es la carga de requerimiento en [m.c.a], P_f y P_i son la presión en la posición inicial y final en [Pa], V_f y V_i son la velocidad en la posición inicial y final en [m/s], z_f y z_i son la altura en la posición inicial y final en [m], h_T corresponde a las pérdidas de carga totales en [m.c.a], ρ_f es la densidad del fluido en [kg/m^3] y g es la aceleración de gravedad en [m/s^2].

En un sistema de circuito cerrado, el fluido es bombeado en un ciclo continuo, donde el punto de entrada y salida del fluido en el circuito es el mismo [42]. Por lo anterior, se puede asumir que la presión estática, velocidad y elevación son iguales en la entrada y salida de la bomba. En consecuencia, la variación de presión del circuito corresponde a pérdidas por fricción únicamente, es decir: $h_{req} = h_T$.

Por otro lado, los sistemas de distribución de agua pueden ser diseñados para flujo constante (con variación en la temperatura de ida y retorno) o flujo variable (con temperatura de retorno constante).

Flujo constante: se pueden aplicar en sistemas pequeños por la simplicidad en el diseño y operación, disminuyendo los costos del sistema de bombeo.

Flujo variable: un sistema de bombeo de flujo variable permite regular el caudal exacto requerido por un conjunto de consumo, reduciendo el flujo y la presión, y disminuyendo la energía de bombeo a carga parcial.

3.1.2.3.4. Vaso de expansión

El vaso de expansión tiene como fin absorber las variaciones de volumen de un fluido contenido en un circuito cerrado al variar su temperatura, manteniendo la presión entre límites preestablecidos e impidiendo, al mismo tiempo, pérdidas y reposiciones de la masa de fluido.

Para dimensionarlo se utiliza la norma UNE-100-155-88 [1] y en primer lugar se debe calcular el coeficiente de expansión del agua que representa la relación entre el volumen útil del vaso de expansión y el volumen del fluido contenido en la instalación. Este coeficiente dependerá de las temperaturas máximas de trabajo (t en [°C]), en donde para temperaturas desde 30 a 120 °C se puede utilizar:

$$C_e = (3,24 \cdot t^2 + 102,13 \cdot t - 2708,3) \cdot 10^{-6} \quad (3.40)$$

Además se debe considerar el coeficiente de presión que siempre será positivo y mayor que la unidad, que representa la relación entre el volumen total y el volumen útil del vaso de expansión. Para el caso de vaso de expansión con diafragma:

$$C_p = \frac{P_M}{P_M - P_m} \quad (3.41)$$

Para un vaso de expansión cerrado, con fluido en contacto directo o indirecto (diafragma) con un gas presurizado, el volumen total del vaso se calculará considerando que la instalación tiene un volumen total V , y entonces el volumen requerido del vaso es:

$$V_{total} = V \cdot C_e \cdot C_p \quad (3.42)$$

La presión mínima de funcionamiento, se elegirá de manera que, en cualquier punto del circuito y con cualquier régimen de funcionamiento de la bomba de circulación, la presión

existente sea superior a la presión atmosférica o a la tensión de saturación del vapor de agua a la máxima temperatura de funcionamiento, la mayor entre las dos.

La presión máxima de funcionamiento será ligeramente menor que la presión de tarado de la válvula de seguridad, que, a su vez, será inferior a la menor entre las presiones máximas de trabajo de los equipos y aparatos que forman parte del circuito.

En resumen, el cálculo se hará siguiendo los siguientes pasos:

- Se calcula el volumen total de agua contenido en el circuito (tuberías, generadores, unidades terminales, etc.), haciendo uso de los datos suministrados por los fabricantes.
- Se determina la temperatura máxima de funcionamiento del sistema. En caso de circuitos de agua caliente y sobrecalentada, esta temperatura será la media entre las temperaturas de impulsión y de retorno.
- Se calcula el coeficiente de expansión con la fórmula indicada.
- Se identifican las presiones de trabajo y se calcula el coeficiente de presión por medio de la ecuación correspondiente.
- Por último, se calcula el volumen total del vaso de expansión con la primera ecuación dada.

3.1.3. Demanda conjunto habitacional

Una vez que se determinen las demandas térmicas y requerimiento de cada vivienda se debe determinar la demanda térmica total del conjunto habitacional.

Para esto, se debe considerar la diversidad de demanda de los consumidores debido a que es poco probable que todos los usuarios ocupen el sistema en su máxima capacidad al mismo tiempo. Para el caso de este estudio se debe a que es poco probable que todas las viviendas de un condominio tengan encendido todos los radiadores (o piso flotante) en su máxima capacidad al mismo tiempo, es más probable que algunas de las viviendas solo tengan encendido el sistema en las habitaciones que están en uso.

Por lo que el sistema debe diseñarse considerando que la carga máxima del conjunto será menor que la suma de las cargas individuales de cada vivienda. Werner (1984) realizó un estudio de las cargas en calefacción de 6 sistemas de calefacción distrital de baja temperatura en Suiza y encontró un factor de simultaneidad (FS) de demanda de entre 0,57 a 0,79 con un promedio de 0,685 [41].

Entonces, la carga total que debe generarse en la planta para abastecer a N viviendas idénticas, siendo Q_i la carga de cada vivienda, es:

$$Q_{total} = FS \cdot N \cdot Q_i + Q_{pérdidas_{red}} \quad [W] \quad (3.43)$$

3.2. Red de distribución

La red de distribución contempla todo el sistema de tuberías de ida y retorno a la vivienda desde la central de generación, el sistema de bombeo y sistemas auxiliares. Se debe diseñar minimizando las pérdidas térmicas y de carga y considerando las presiones y temperaturas requeridas por el sistema de conexión a la vivienda.

3.2.1. Equipos principales

3.2.1.1. Tuberías

Las tuberías de la red permiten el transporte de la central de generación hasta las viviendas, por lo que el material debe ser capaz de soportar una larga vida para la temperatura de trabajo. Para el caso de sistemas de baja temperatura, las pérdidas térmicas son menores que en casos de alta temperatura por lo que se puede utilizar materiales económicos que resistan la corrosión con grados de aislación menores que para sistemas de alta temperatura.

Para calcular las pérdidas térmicas y de carga en las tuberías de distribución se debe escoger el tipo de tubería, material y configuración de la red:

3.2.1.1.1. Tipos de tuberías

Una red de distribución puede dividirse inicialmente como redes superficiales o enterradas, en ambos casos es necesario que la tubería se aisle para evitar las pérdidas térmicas durante la distribución. Las redes superficiales tienen menor costo inicial y fácil mantención pero no son recomendadas cuando la red se ubica en zona urbana.



Figura 3.12: Tuberías superficiales de la red de distribución [41]

Dado que este estudio considera el abastecimiento a una zona urbana solo se evalúa la red subterránea. Dentro de los tipos de redes subterráneas se pueden encontrar distintos tipos según cómo se instalen las líneas de suministro y retorno.

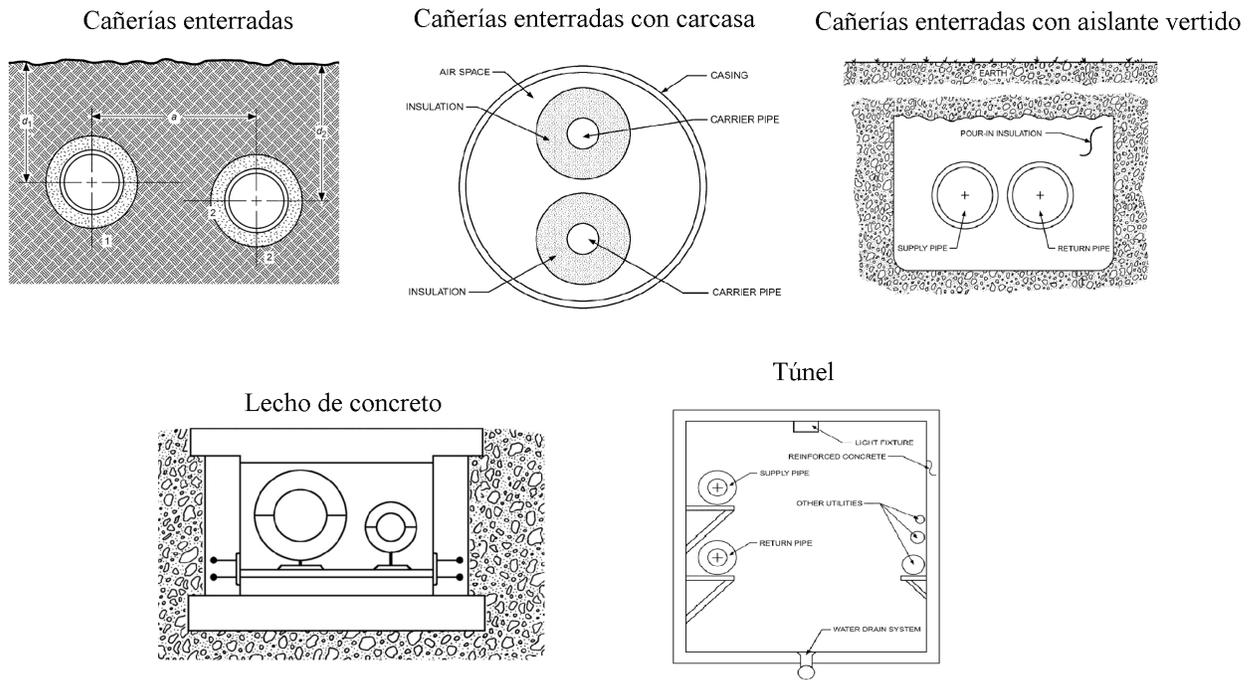


Figura 3.13: Tuberías subterráneas de la red de distribución [41]

Cañerías enterradas: son la configuración más utilizada en el mundo por su facilidad de instalación y menor costo. Una desventaja es que las tuberías descansan en el mismo aislante, pudiendo afectarlo a largo plazo.

Cañerías enterradas con carcasa: debido a la carcasa, se permite aislar las tuberías de las condiciones externas mejorando su respuesta a la degradación. Además se tiene aislación adicional debido a la misma carcasa y la cámara de aire que se genera.

Cañerías enterradas con aislante vertido: dado que las tuberías se rodean de una cámara aislante, se reduce significativamente las pérdidas térmicas. Sin embargo presenta problemas debido a que las tuberías descansan en el mismo aislante y además son más costosas.

Lecho de concreto: este tipo de instalación facilita las labores de mantenimiento de la red, así como también la protección de la aislación frente a los agentes externos. Además permite utilizar la red para la distribución de otros servicios en el mismo espacio (fibra óptica, cableado telefónico, etc.).

Túnel: tiene las mayores facilidades de mantenimiento e inspección pero su implementación tiene los costos más elevados.

3.2.1.1.2. Configuración

Además, se pueden encontrar distintos tipos de configuración de la red:

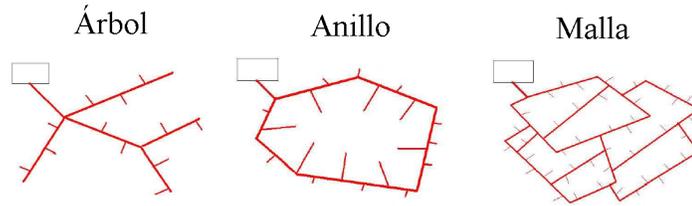


Figura 3.14: Tipos de configuración de la red de distribución [39]

La configuración tipo árbol resulta adecuada cuando la fuente de calor es única (aunque no necesariamente impide la incorporación de más centrales generadoras) y además permite minimizar las longitudes de los tendidos de la red.

La configuración tipo anillo facilita la incorporación de nuevas centrales generadoras de calor y facilita la incorporación de nuevos suscriptores. Frente a fallas o cortes en pequeños tramos la operación de la red principal puede mantener su operación. Sin embargo, las mayores longitudes en el trazado aumentan los costos de la inversión, al mismo tiempo de tenerse mayores pérdidas térmicas.

La configuración tipo malla permite adaptabilidad frente a fallas puntuales y ampliaciones e incorporaciones de suscriptores. Resulta compleja de gestionar y de alto costo de implementación.

Sea cual sea la configuración escogida, para facilitar la localización y reparación de fugas y para limitar los daños causados por fugas, se recomienda que los puntos de la red no estén separados a más de 500 [ft] (150[m]) [41].

3.2.1.1.3. Pérdidas térmicas

A pesar de que la aislación de cañerías provee de resistencia térmica ante las pérdidas y ganancias debido a la diferencia de temperatura entre el suelo y el fluido de trabajo, es necesario calcular las pérdidas térmicas durante la distribución.

En primer lugar, para determinar la diferencia de temperatura entre el suelo y el fluido se debe calcular la temperatura del suelo a la profundidad en la que se instale la zanja de distribución. Para esto se tiene que a bajas profundidades (entre 0 a 10 [m]) la temperatura del suelo se puede estimar como [37]:

$$T_{suelo}(z, t) = T_m - T_p \cdot e^{-z\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}} \cdot \cos\left(wt - \varphi - z\frac{w}{2\alpha}\right) \quad (3.44)$$

Donde T_m corresponde a la temperatura media del suelo en la superficie y se puede aproximar a la temperatura media de la localidad [°C], T_p corresponde a la desviación máxima o amplitud anual de las temperatura promedio mensuales [°C], z corresponde a la profundidad

desde la superficie en donde se instalan las tuberías, w es la frecuencia angular en $[rad/s]$ en donde el ciclo de temperatura se considera como 1 año, α es la difusividad térmica del suelo $[m^2/s]$, t es el tiempo en el que se está evaluando la temperatura $[s]$ y φ es el desfase $[rad]$ de la curva.

El término asociado al desfase φ se incluye pues el suelo presenta un desfase de 35 días aproximadamente en la temperatura a profundidades con respecto a la temperatura superficial debido a su inercia térmica.

Tras tener la temperatura del suelo a la profundidad en que se instalarán las tuberías, se pueden calcular las pérdidas térmicas.

En primer lugar, para incorporar la transferencia de calor entre la superficie del suelo y el ambiente por convección se agrega una capa de suelo ficticia a la profundidad del entierro para tener en cuenta el efecto de la resistencia a la transferencia de calor por convección en el suelo. Se calcula el espesor efectivo como:

$$\delta = \frac{k_s}{h_c} \quad [m] \quad (3.45)$$

Donde k_s corresponde a la conductividad térmica del suelo $[W/m K]$ y h_c es el coeficiente convectivo en la superficie $[W/m^2 K]$ y se calcula según ecuación 3.13. Este espesor efectivo debe sumarse a la profundidad seleccionada de instalación de la red al momento de calcular la resistencia de las tuberías.

Debido a la facilidad de instalación y menores costos, solo se estudian las tuberías enterradas aisladas, en donde se utiliza una tubería de ida y otra de retorno tal como se muestra a continuación:

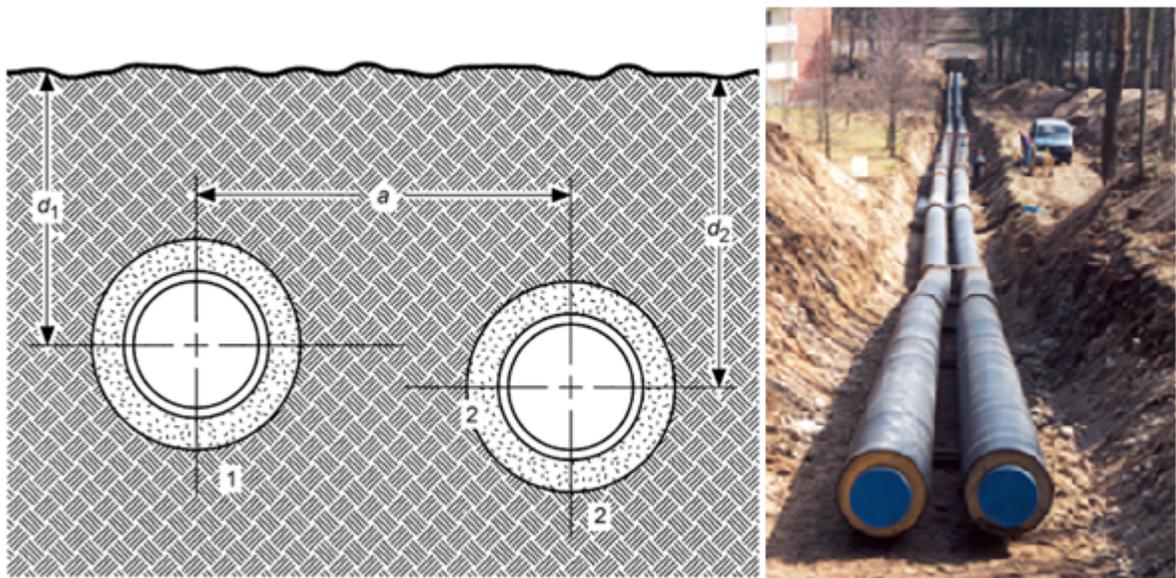


Figura 3.15: Tuberías de la red de distribución [41]

Dado que se utiliza un sistema de distribución con una tubería de ida y otra de retorno, no basta con calcular la resistencia térmica de cada tubería, sino que se debe estudiar la influencia que tiene una sobre la otra.

Para esto se consideran 2 constantes adimensionales, en primer lugar se tienen constantes θ que incorporan el efecto de la diferencia de temperaturas entre las 2 líneas. Y por otro lado, se tiene la constante P que corresponde al factor geométrico y que incorpora el efecto de la distancia que separa las 2 líneas así como también la diferencia entre sus dimensiones (diámetros) [41]:

Factores de temperatura

$$\theta_1 = \frac{T_{p2} - T_s}{T_{p1} - T_s} \quad (3.46)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{\theta_1} = \frac{T_{p1} - T_s}{T_{p2} - T_s} \quad (3.47)$$

Donde T_s corresponde a la temperatura del suelo a la profundidad escogida y T_{p1} , T_{p2} son las temperaturas de los fluidos que circulan por la tubería 1 y 2 respectivamente.

Factores geométricos

$$P_1 = \frac{1}{2\pi \cdot k_s} \ln \left(\frac{(d_1 + d_2)^2 + a^2}{(d_1 - d_2)^2 + a^2} \right)^{0,5} \quad (3.48)$$

$$P_2 = \frac{1}{2\pi \cdot k_s} \ln \left(\frac{(d_1 + d_2)^2 + a^2}{(d_2 - d_1)^2 + a^2} \right)^{0,5} \quad (3.49)$$

Donde k_s es la conductividad térmica del suelo, d_1 y d_2 [m] son los diámetros externos de las tuberías 1 y 2 y a la distancia horizontal entre los centros de ambas tuberías [m] (figura 3.15).

La resistencia térmica efectiva de cada tubería en un circuito de doble tubería está dada por:

$$R_{e1} = \frac{R_{t1} - \left(\frac{P_1^2}{R_{t2}} \right)}{1 - \left(\frac{P_1 \theta_1}{R_{t2}} \right)} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.50)$$

$$R_{e2} = \frac{R_{t2} - \left(\frac{P_2^2}{R_{t1}} \right)}{1 - \left(\frac{P_2 \theta_2}{R_{t1}} \right)} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.51)$$

Donde R_t es la resistencia total de cada tubería con aislamiento si es que fuera única. Esta resistencia se calcula considerando que la resistencia de una tubería depende de su diámetro externo (d_e) el interno (d_i) y la conductividad del material de tubería (k_p):

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \quad (3.52)$$

La ecuación anterior sirve para el cálculo de cualquier región concéntrica, por lo que una tubería aislada se puede determinar como la suma de la resistencia de la tubería (R_p) y la resistencia del aislamiento (R_i):

$$R_t = R_p + R_i \quad (3.53)$$

Entonces el flujo de calor debido a la diferencia de temperatura con el suelo en cada tubería se calcula con:

$$q_1 = \frac{T_{p1} - T_s}{R_{e1}} \quad [W/m] \quad (3.54)$$

$$q_2 = \frac{T_{p2} - T_s}{R_{e2}} \quad [W/m] \quad (3.55)$$

Para determinar el calor total perdido en [W], se debe multiplicar el flujo de calor por el largo de cada tubería. Finalmente, al diseñar se debe considerar que la demanda total será lo requerido por las viviendas considerando el factor de simultaneidad y el calor que se pierde por concepto de distribución.

Se debe diseñar de tal forma que las pérdidas por distribución no superen el 10 % del calor total generado [41].

3.2.1.2. Bombas

Las bombas también juegan un papel indispensable en una red de distribución pues permiten mantener el caudal y presión requerido por los consumidores. Éstas se dimensionan de la misma forma que se mostró en la sección 3.1.2.3.

Para sistemas distritales el diseño de flujo variable presenta mayores ventajas [41] dado que puede mejorar el uso de la energía y permite expandir la capacidad de distribución al considerar la diversidad de los consumidores.

3.2.1.3. Válvulas

Un sistema de calefacción distrital requiere válvulas que cumplan las funciones de aislamiento de tramos y control de flujo. Los sistemas de aislamiento son necesarios para aislamiento de secciones frente a fallas, corte momentáneo para realizar mantenimiento o corte del servicio por parte de un suscriptor. Mientras que las válvulas de control de flujo, permiten asegurar el no retorno del fluido frente a fallas en el sistema de bombeo [39].

Al implementarse la red con bombas de velocidad variable, el control de caudal es realizado por la bomba, por lo que no sería necesaria la incorporación de válvulas para la regulación del caudal de flujo.

Si bien un sistema hidráulico complejo como el de una red de calefacción distrital requiere la incorporación de un sin número de otros componentes de control de la red, su consideración se escapa a los alcances de un estudio de factibilidad por lo que solo se estudia la incorporación de válvulas de contraflujo y corte.

Válvulas de contraflujo

Son también conocidas como válvulas de retención, check, de no retorno, entre otros nombres. Son válvulas integrales que están destinadas a impedir la inversión del flujo en las tuberías. Principalmente, su funcionamiento es automático y se mantienen abiertas por la presión del flujo que circula. Y sólo se cierra con el paso del mecanismo de retención o por la contrapresión cuando se invierte el flujo [45].

Las válvulas de retención tienen el propósito de permitir el flujo en un solo sentido y su aplicación principal es en la descarga de bombas. Su función es prevenir que el flujo bombeado regrese una vez que las bombas se detienen. También evitan que el flujo de retorno provoque un giro inverso de las bombas, lo cual puede en algunos casos, dañar los equipos de bombeo.

Válvulas de corte

Este tipo de válvulas permite aislar secciones cortando el flujo de forma total o parcial. En el caso de las válvulas de corte se asume que el tipo de válvula más apropiado para un sistema de calefacción distrital es la válvula de compuerta. Estas válvulas son de bajo costo, alta capacidad y hermeticidad y poca resistencia a la circulación. La principal desventaja de estas válvulas es su escasa capacidad de control de flujo, caso que es de poco interés en la presente evaluación.

Disposición

La instalación de válvulas de corte debe permitir aislar cada tramo de la red por lo que se recomienda que se disponga de válvulas de corte en todos los nodos de la red, tanto en suministro como en retorno.

En el caso de las válvulas check, su principal interés es evitar el contraflujo que eventualmente pudiera dañar a las bombas, por lo que se incorporan estas válvulas inmediatamente aguas abajo de éstas.

3.2.2. Diseño hidráulico

Para el cálculo del caudal requerido, pérdidas de carga y dimensionamiento del vaso de expansión se tienen las mismas ecuaciones utilizadas en el diseño hidráulico de la red de distribución dentro de la vivienda.

Sin embargo, a nivel distrital de sistemas de agua caliente se debe diseñar para que las pérdidas de presión se limiten hasta 100 [Pa] por metro de tubería y una velocidad de entre 0,5 a 2 [m/s] [41].

3.2.3. Densidad de conexión

Un indicador importante para estimar si una red de calefacción distrital puede ser económicamente rentable, es la densidad de conexión, equivalente al concepto de “demanda de energía por metro lineal” .

La densidad de conexión se define como la relación entre la cantidad de calor anual vendido o entregado, en unidades de [MWh/año], y la longitud total de las líneas de conexión principal, secundaria y domiciliaria, en metros.

$$\text{Densidad de conexión} = \frac{\text{Suministro de energía anual [MWh]}}{\text{Largo total red [m]}} \quad (3.56)$$

La experiencia internacional indica que las zonas de suministro de calor con una densidad de conexión menor a 2 [MWh/(año m)] se consideran generalmente poco atractivas en la fase final de construcción [22].

A modo de referencia las densidades de conexión mínimas recomendadas para hacer una primera evaluación económica del sistema distrital son:

Estados de expansión	Densidad de conexión de distribución de calor	
	Condiciones favorables [MWh/(año·m)]	Condiciones desfavorables [MWh/(año·m)]
Primera etapa	> 0.7	> 1.4
Etapas de expansión	> 1.2	> 2.0

Figura 3.16: Densidad de conexión recomendada en red de distribución [22]

En donde los escenarios favorables y desfavorables son:

- Escenario de **condiciones favorables**, en donde se tienen fuentes de energía a muy buen precio (como la biomasa en algunas ciudades, geotermia, o energía solar), o bien condiciones constructivas que permiten la disminución de costos de inversión (aprovechamiento de trabajos de intervención existentes, infraestructura existente).
- Escenario de **condiciones desfavorables**, que no cuenta con ninguna de las condiciones mencionadas para el escenario favorable.

3.3. Planta de generación

La planta de generación es la encargada de producir la energía térmica requerida por todo el sistema, tal como se mencionó antes para este estudio se utiliza energía geotérmica de muy baja entalpía para la generación de calor para uso en calefacción.

La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene al aprovechar el calor del interior de la Tierra y al ser de muy baja entalpía quiere decir que basa sus aplicaciones en la capacidad que el subsuelo posee de acumular calor y de mantener una temperatura sensiblemente constante a lo largo de todo el año. Se basa en el calor irradiado por el sol que se almacena en los estratos superiores de la Tierra y en las aguas subterráneas y además el flujo de calor desde el interior de la Tierra a la superficie.

Las temperaturas que se pueden obtener variarán según el tipo de sistema de extracción utilizado y el potencial geotérmico del sitio, pero en general, los recursos de baja entalpía tienen temperaturas inferiores a 30°C . A modo de aproximación se considera:

- **Profundidades menores de 10 [m]:** está gobernada por factores climáticos, por lo que para calcularla se deben considerar estas fluctuaciones estacionales que se calculan de la misma forma que se mostró anteriormente (Ecuación 3.43).
- **Profundidad del orden de 10-20 [m]:** se puede considerar que la temperatura del suelo será la temperatura media anual de la localidad
- **Profundidades mayores a 10-20 [m]:** tras alcanzar la temperatura media anual a los 10 [m] el gradiente geotérmico de la tierra aumenta aproximadamente 3°C por cada 100[m] [17]

3.3.1. Equipos principales

Dentro de los equipos fundamentales de un sistema de generación de energía geotérmica de muy baja entalpía se encuentra en primer lugar el sistema de captación geotérmica, las bombas de calor, estanque de inercia, equipos auxiliares como bombas, vaso de expansión y control, entre otros. El esquema general de una instalación geotérmica se muestra a continuación:

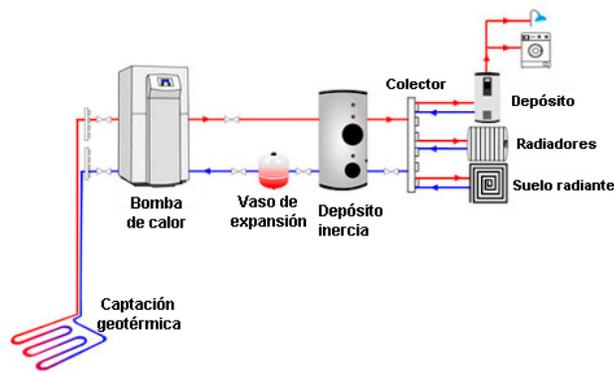


Figura 3.17: Esquema general del sistema de generación con geotermia

3.3.1.1. Intercambiadores de calor geotérmicos

Existen distintos tipos de intercambiadores de calor geotérmicos de acuerdo a la forma como se instalan las tuberías o serpentines que van bajo el suelo.

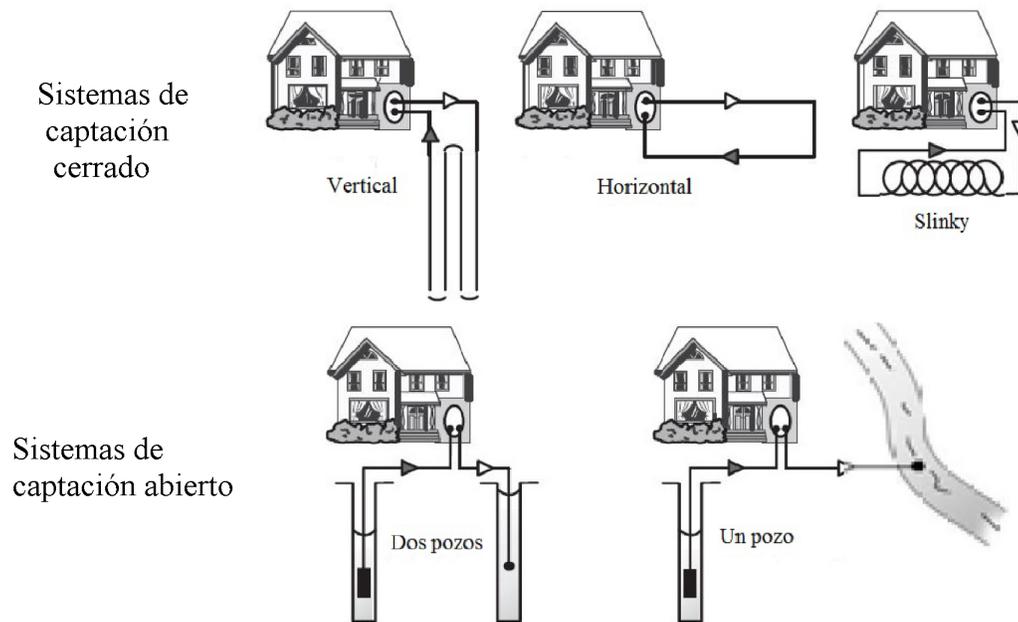


Figura 3.18: Tipos de sistemas de captación [4]

En primer lugar se distinguen los sistemas de captación cerrados en los que el fluido caloportador va por una red de tuberías cerradas y el fluido no tiene contacto directo con el suelo sino que el intercambio de calor se produce en las paredes externas de la tubería. Por otro lado, se tienen sistemas de captación abierto, en donde se aprovechan las aguas subterráneas como fluido de trabajo debido a que se mantienen a temperatura constante entre estaciones.

Otra subdivisión entre los distintos tipos de intercambiadores cerrados son los horizontales y los verticales. En donde los sistemas horizontales consisten en una red o intercambiador de calor con el suelo que se suele disponer con forma de serpentín a bajas profundidades del orden de los 0,5 a 2 [m]. La instalación es más sencilla y económica que la captación vertical pero tiene un menor rendimiento debido a que está más condicionado por el clima exterior debido a su cercanía con la superficie y además se obtienen menores temperaturas.

Para los sistemas horizontales los rendimientos esperados son de 10 a 15 [W] de potencia por metro lineal de tubería y la superficie requerida es de 1,5 veces la superficie habitable a calentar, en el caso de vivienda nueva, y hasta 3 veces para casas antiguas con malos aislamientos térmicos [17] .

Los sistemas verticales cerrados son tuberías que descienden a profundidades de entre 50 a 150 [m] y se rodean de una mezcla de mortero con alta conductividad térmica. Tienen

por ventaja con respecto a los horizontales que ocupan menor superficie, permiten obtener mayor temperatura y por lo tanto mejor rendimiento debido a que está más aislado de las condiciones climatológicas, pero por desventaja se tiene que es más costoso que los sistemas horizontales. Los rendimientos esperados de este tipo de sistemas son de 20 a 70 [W] de potencia por metro lineal de tubería [17].

3.3.1.2. Bombas de calor

Una bomba de calor es una máquina que en modo calefacción permite intercambiar y transferir calor desde un foco caliente a otro frío utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña. Por tanto, la ventaja que poseen las bombas de calor frente a otros sistemas, reside en su capacidad para aprovechar la energía existente en el ambiente, tanto en el aire como en el agua o la tierra, y que le permite calefactar las dependencias interiores con una aportación relativamente pequeña de energía eléctrica.

Las bombas de calor geotérmicas utilizan el calor extraído de la tierra con alguno de los sistemas de captación y con esta energía impulsa su proceso interno de generación de calor o frío mediante ciclos de presurización y condensación de gases de alta capacidad calórica.

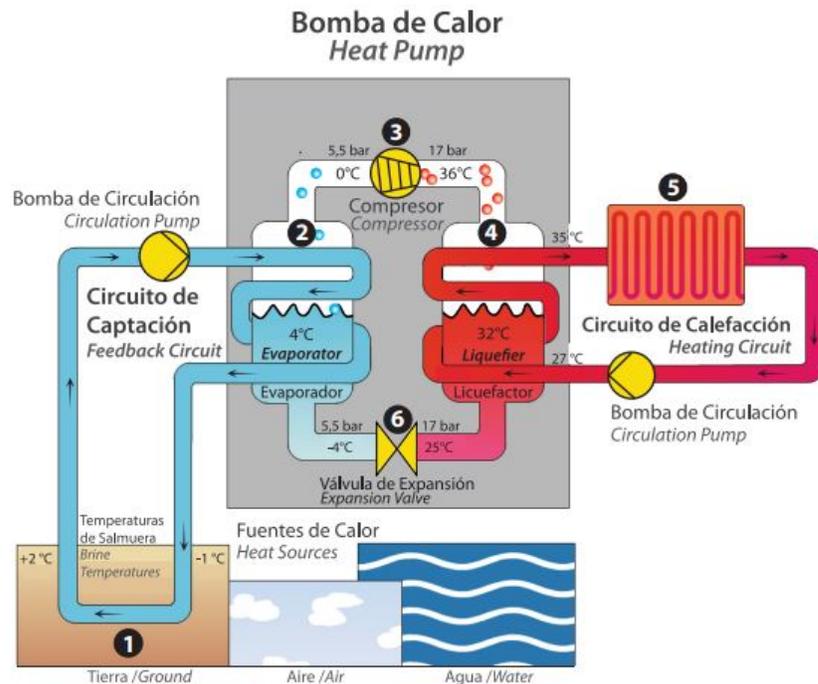


Figura 3.19: Bomba de calor[29]

En la figura, se puede observar el diagrama del proceso de una bomba de calor, donde en primer lugar, mediante algún sistema de captación se extrae energía de baja entalpía de la tierra y se lleva a superficie (1), donde con la energía extraída del medio, mediante un intercambiador de calor, la bomba de calor evapora un líquido refrigerante que circula en su interior (2), esto permite que el gas evaporado entre a un compresor accionado por energía eléctrica, el cual comprime y eleva la temperatura del gas (3).

El gas comprimido a mayor temperatura pasa a un segundo intercambiador donde transfiere su calor al agua que se va a utilizar para calefacción (4) la cual se puede almacenar en un estanque térmico para luego entrar a un circuito de calefacción (5). Durante la transferencia de calor el gas va perdiendo energía y pasa a estado líquido, donde finalmente llega a una válvula de expansión donde pierde presión con lo cual el gas se licua totalmente y queda en condiciones de repetir el ciclo (6).

Si bien este sistema produce energía térmica para calefaccionar también consume energía eléctrica para operar y la eficiencia del mecanismo se puede determinar con el uso del coeficiente de rendimiento (COP) que compara la energía de salida en el condensador para calefaccionar [Q] con la potencia eléctrica suministrada al compresor [W]:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (3.57)$$

Tanto la potencia calorífica o frigorífica de la bomba de calor como la eficiencia energética (COP) pueden variar según la temperatura de trabajo, independiente de las eficiencias mecánicas y térmicas de los distintos componentes de la máquina.

Al aumentar la temperatura de evaporación (mayor temperatura de captación), y por lo tanto la presión, el compresor tiene que trabajar menos para llegar a la misma presión en el condensador y el gasto de electricidad disminuye.

Un aumento del COP de la bomba implica automáticamente que se está utilizando una mayor proporción de energía geotérmica y por lo tanto mayor largo requerido para los intercambiadores de calor cerrados.

3.3.1.3. Estanque de inercia

Cuando el generador de calor es una bomba de calor como en este caso, usualmente se recomienda el uso de un pequeño depósito de inercia, para evitar que las maniobras de arranque y paro del compresor sean muy continuadas debido al pequeño salto térmico entre la ida y retorno del agua.

El principio básico del almacenamiento térmico es que el agua a diferentes temperaturas se puede almacenar en el mismo estanque sin mezclar. El fenómeno anterior se llama estratificación térmica y se debe a que el agua caliente tiene una densidad menor que el agua fría y por lo tanto permanecerá en la parte superior del tanque mientras que el agua fría permanecerá en la parte inferior del tanque.

El método utilizado en el dimensionamiento consiste en buscar la relación entre la menor potencia demandada versus la menor potencia del compresor, para confirmar que el estanque va a ser capaz de suplir la demanda exigida sin necesidad de sobre exigir a la bomba de calor, según la siguiente expresión [44]:

$$m = \frac{(\dot{Q}_{min_{BCG}} - \dot{Q}_{min_{viv}}) \cdot \Delta t}{\Delta T_{op} \cdot c_p} \quad [kg] \quad (3.58)$$

Donde m es la masa de agua del estanque [kg], $\dot{Q}_{min_{BCG}}$ es la potencia mínima de operación de la bomba de calor [W], $\dot{Q}_{min_{viv}}$ es la potencia mínima demandada por el conjunto habitacional [W], Δt corresponde al tiempo de operación de diseño en el que el compresor no operará [s], ΔT_{op} corresponde a la diferencia de temperatura entre ida y retorno [°C] y c_p es el calor específico del agua [J/kg K].

3.3.1.4. Otros componentes

Las bombas circuladoras, vaso de expansión y válvulas se deben dimensionar y ubicar según los mismos criterios expuestos anteriormente.

3.3.2. Intercambiadores de calor cerrados

A continuación se detallan los fundamentos teóricos y ecuaciones requeridas para el dimensionamiento de intercambiadores de calor cerrado:

En el diseño de los intercambiadores de calor enterrados intervienen múltiples factores que hacen factibles distintas variantes de diseño para un mismo sistema. Existen en el mercado varios programas comerciales de diseño de intercambiadores de calor enterrados, sin embargo para este trabajo se utilizará la metodología de diseño de International Ground Source Heat Pump Association (Asociación Internacional de Bombas de Calor de Fuente Terrestre - IGSHPA), metodología válida para una primera aproximación al diseño de sistemas geotérmicos.

El método IGSHPA para el diseño de intercambiadores enterrados está basado en la teoría de la fuente de calor en forma de una línea infinita desarrollado por Ingersoll y Plass. Según esta teoría un intercambiador de calor que cede calor al terreno se comporta como una fuente de calor con un espesor pequeño y una longitud infinita, y por tanto sólo cede calor en el sentido radial.

Es un método de cálculo estático que asume que el sistema funciona durante un tiempo determinado a una carga constante y con el terreno a la temperatura más desfavorable, es decir, el mes de enero para refrigeración y el mes de junio para calefacción, y con una temperatura del fluido caloportador fija. Durante el resto de los meses, las cargas térmicas de las viviendas serán menores y además el suelo no estará tan frío (en invierno) o tan caliente (en verano), lo que hará que la temperatura del agua sea más moderada y el sistema funcionará con un mayor rendimiento.

3.3.2.1. Fluidos y materiales de trabajo

En primer lugar, se debe elegir el fluido caloportador del circuito, en donde se debe incorporar anticongelante al agua como propelinglicol o etilenglicol en casos donde pudiese existir

congelamiento del fluido.

Tabla 3.5: Características de los fluidos de intercambiador de calor cerrado [10]

Fluido circulante en ICG			
	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol
Calor específico [kJ/kgK]	4,187	2,185	2,50371
Viscosidad dinámica a 0°C [Pa s · 10 ⁻³]	1,79	57,4	243
Viscosidad dinámica a 20°C [Pa s · 10 ⁻³]	1,01	20,9	60,5
Viscosidad dinámica a 40°C [Pa s · 10 ⁻³]	0,655	9,5	18
Densidad a 20°C [g/cm ³]	1	0,9259	0,863
Conductividad térmica [W/ m K]	0,6	0,26	0,2
Viscosidad cinemática [m ² /s]	1,4E-06	4,2E-05	1,8E-04

A continuación se puede observar el efecto de incorporar distintos porcentajes de etilenglicol o propilenglicol en la temperatura de congelamiento del fluido caloportador:

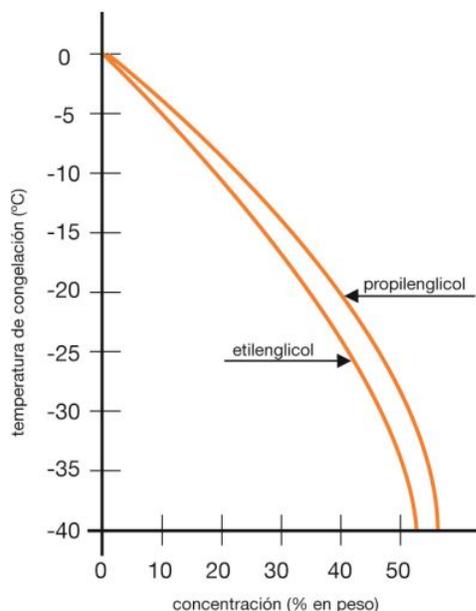


Figura 3.20: Punto de congelamiento para mezcla de agua y etilenglicol o propilenglicol [30]

Con respecto a las tuberías utilizadas en los sistemas de captación cerrado, los materiales más comunes son el polietileno (PE) y el polibutileno (PB). Ambos son flexibles a la vez que resistentes y pueden unirse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. Tanto el polietileno normal (PE) y reticulado (PEX) como el polibutileno (PB) se comportan adecuadamente a las temperaturas de trabajo del intercambiador de calor fijadas por la bomba de calor, y que dependen del punto de trabajo de la bomba de calor seleccionada.

Un parámetro clave que tiene que elegir el diseñador del sistema es la temperatura del fluido que circula 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 operación de la bomba de calor, se debe fijar las temperaturas máximas y mínimas de trabajo ($T_{m\acute{a}x}$, $T_{m\acute{i}n}$). Además, se puede determinar la temperatura de salida tras el paso de la bomba de calor con:

$$T_{salida,c} = T_{entrada,c} - \frac{P_c \cdot \rho \cdot \frac{COP-1}{COP}}{c_p \cdot \dot{Q}} \quad (3.59)$$

Donde $T_{entrada,c}$ es la temperatura a la que ingresa el fluido a la bomba, P_c la potencia de la bomba de calor [W], ρ la densidad [kg/m^3] c_p el calor específico del fluido [J/ kg °C] y \dot{Q} el caudal [m^3/s].

Finalmente, se debe seleccionar el diámetro de tubería que mejore el funcionamiento térmico manteniendo las pérdidas de presión bajas. Considerando:

1. Debe ser lo suficientemente grande para mantener bajas caídas de presión y así requerir de menor potencia de bombeo
2. Debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades y así garantizar la turbulencia del fluido para mejorar la transferencia de calor. Para esto se debe cumplir:

$$Re = \frac{4Q}{\pi \vartheta D} > 2300 \quad (3.60)$$

Donde Re es el número de Reynolds, Q el caudal [m^3/s], D el diámetro de la tubería [m] y ϑ la viscosidad cinemática [m^2/s].

3.3.2.2. Configuración del circuito

Se debe determinar además la configuración según la trayectoria del fluido, pudiendo ubicarse los intercambiadores de calor en serie o en paralelo. Las ventajas y desventajas de cada sistema son:

Paralelo

- Ventaja: costos de instalación más bajo al disminuir los diámetros necesarios y la cantidad del fluido

- Desventaja: pueden existir problemas para equilibrar los flujos entre los distintos bucles

Serie

- **Ventaja:** la trayectoria del fluido está bien definida, se puede eliminar el aire fácilmente purgando. Se puede usar diámetro mayor manteniendo la turbulencia por lo que el rendimiento térmico es mejor al aumentar el área de intercambio de calor
- **Desventaja:** la longitud está limitada por la caída de presión del fluido, al aumentar el diámetro también aumentan los costos en tubería y en fluido de intercambio.

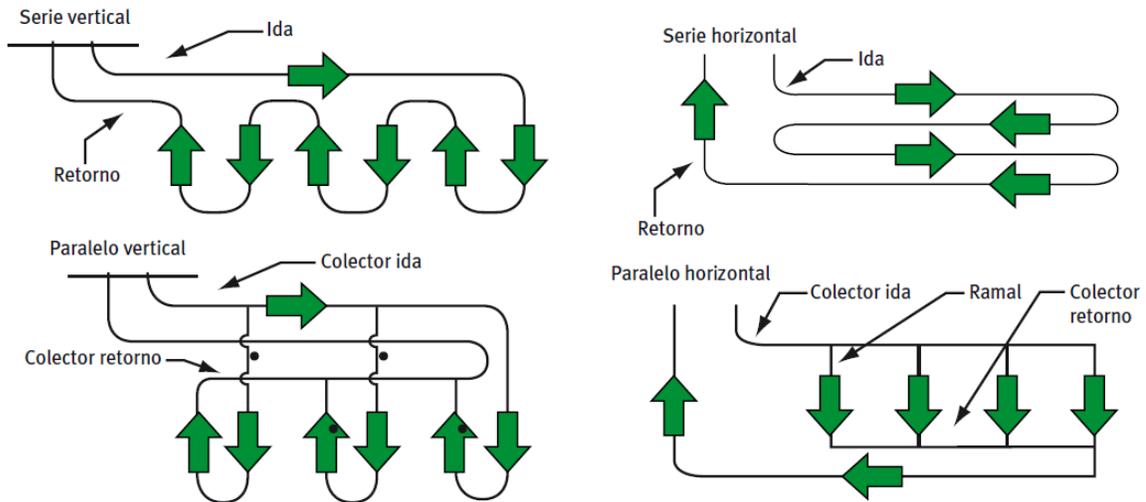


Figura 3.21: Trayectoria del fluido en serie o paralelo para el caso vertical y horizontal [17]

3.3.2.3. Dimensionamiento

Para realizar el dimensionamiento de estos sistemas se debe considerar el calor total requerido que dependerá del número de viviendas a abastecer y las pérdidas en su distribución. Además dependerá del COP de la bomba de calor en modo calefacción o refrigeración, cuyo valor se puede obtener de las curvas de operación otorgadas por el fabricante.

El largo del intercambiador de calor en modo calefacción (L_c) se determina con el método IGSHA presentado en la *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado* [10], y es igual a:

$$L_c = \frac{Q_c \cdot \frac{(COP_c - 1)}{COP_c} (R_p + R_s \cdot F_c)}{(T_s - T_{min})} \quad [m] \quad (3.61)$$

Donde Q_c corresponde a la potencia de calefacción, COP_c es el coeficiente de performance en modo calefacción, R_p es la resistencia de las tuberías o del conjunto de tuberías-mortero en el caso de los sistemas verticales, R_s es la resistencia del suelo, F_c es el factor de utilización de la bomba de calor, T_s la temperatura del suelo mínima a la profundidad del intercambiador

y T_{\min} la temperatura mínima del fluido en el circuito captador a la entrada de la bomba de calor.

Únicamente cuando la bomba de calor esté en funcionamiento se intercambiará calor con el suelo. Considerando que la bomba de calor se dimensiona para las condiciones más desfavorables, cuando la carga de la vivienda sea inferior a la potencia de la bomba de calor, ésta funcionará de forma intermitente. Este aspecto afecta a la resistencia térmica del suelo ya que para el cálculo de R_s es necesario saber la cantidad de calor total a extraer o inyectar durante un determinado tiempo.

Para considerar este efecto se determina la fracción de tiempo que está en marcha la bomba de calor equivalente a F_c y corresponde al cociente entre la demanda térmica de la vivienda dividido por la potencia de la bomba de calor.

Resistencia térmica del suelo

La resistencia térmica del suelo se puede determinar con [17]:

$$R_s = \frac{1}{4\pi\lambda_s} E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (3.62)$$

Donde E_i denota la función integral exponencial (Carslaw Jaeger), λ_s es la conductividad térmica del terreno [W/mK], α es la difusividad térmica del terreno [m^2/s], t corresponde al tiempo de uso del intercambiador [s], r indica el radio externo del intercambiador de calor geotérmico [m].

La ecuación de la función exponencial integral puede ser simplificada si se cumple lo siguiente [32]:

$$E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) = \ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \quad \text{si } \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (3.63)$$

Donde γ es la constante de euler e igual a 0,5772.

Es importante considerar que la resistencia del suelo de un conjunto de tuberías o perforaciones se verá afectado por la interferencia térmica que se produzca entre ellas. Mientras más alejadas se encuentren las tuberías o perforaciones, menor será la interferencia por lo que la resistencia del suelo será menor y mejorará la conductividad térmica.

Además, para el caso de los intercambiadores horizontales, estos son más susceptibles a las oscilaciones térmicas del suelo, debido a que al estar más cerca de la superficie no sería correcto suponer que la temperatura es constante a lo largo del año. Para introducir el efecto de esta oscilación, se considera la existencia de tubos imagen, simétricamente dispuestos respecto a los reales.

En la siguiente imagen se muestra la ubicación de los tubos imagen:

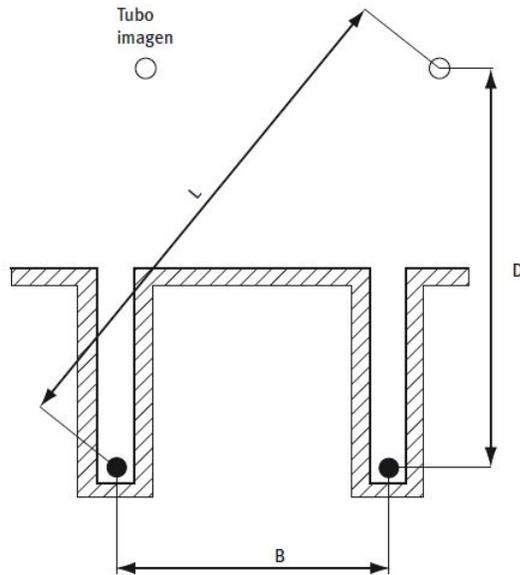


Figura 3.22: Método de tubos imagen para el caso de intercambiadores de calor horizontales

El método de cálculo de la resistencia del suelo de un conjunto de intercambiadores de calor ya sean verticales u horizontales es:

1. Encontrar el valor de R_s para cada tubería o perforación por separado según ecuación 3.62
2. Determinar las distancias de cada tubo a todos los demás, incluyendo para el caso horizontal, los tubos imagen simétricamente dispuestos
3. Calcular la resistencia de cada tubo con respecto al resto, reemplazando el valor del radio por el valor de la distancia que los separa según punto 2.
4. Para obtener la resistencia térmica del suelo promedio se debe sumar las resistencias térmicas de las tuberías enterradas y restar las resistencias térmicas de los tubos imagen. Luego, se debe dividir por el total de tuberías del sistema (sin considerar los tubos imagen).

Para los sistemas de captación vertical, este procedimiento sólo será válido para sistemas geotérmicos que estén balanceados energéticamente. En el caso de que exista un flujo neto estacional el procedimiento solo será válido para un periodo no superior a:

$$T = \frac{H^2}{\alpha} \quad [s] \quad (3.64)$$

Siendo H la profundidad de la perforación en metros y α la difusividad térmica del suelo $[m^2/s]$.

La diferencia entre los intercambiadores cerrados verticales u horizontales radica en 2 cosas principales, en primer lugar la temperatura mínima del suelo es distinta en el sistema vertical con respecto al horizontal. Y además, la resistencia del conjunto de tuberías será distinto para el caso vertical en que las tuberías se encuentran rodeadas de una mezcla de mortero mientras que en el caso horizontal las tuberías van en contacto directo con el suelo.

Por lo que a continuación se presentan las principales diferencias en el cálculo de la resistencia térmica de las tuberías para los 2 sistemas:

3.3.2.3.1. Horizontal cerrado

Para el caso horizontal las tuberías tienen contacto directo con el suelo, por lo que la resistencia de cada tubería es [59]:

$$R_p = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.65)$$

Donde k_p es la conductividad térmica de la tubería [W/mK] y D_o y D_i el diámetro externo e interno respectivamente [m].

Además, cuando se utiliza anticongelante el término convectivo asociado al fluido cobra más relevancia que si solo se utilizara agua como fluido caloportador debido a que la mezcla es más viscosa. Por lo que para incorporar la resistencia térmica del fluido, se suma a la resistencia de la tubería la resistencia advectiva del fluido:

Resistencia térmica advectiva del fluido en las tuberías

La advección se puede considerar como una parte de la transmisión de calor por convección, en la que la velocidad del fluido no se encuentra determinada por la temperatura y en el seno del mismo existe un transporte de masa, que es la que conlleva un intercambio de energía. Por tanto podría ser asimilable al término convección forzada. Se puede determinar con la siguiente ecuación [25]:

$$R_{adv} = \frac{1}{Nuk_r\pi} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.66)$$

Donde Nu corresponde al número de Nusselt y k_r la conductividad térmica del fluido con refrigerante. Para determinar el número de Nusselt se consideran 3 fórmulas según el flujo sea laminar, turbulento o se encuentre en régimen de transición:

$$Nu = \begin{cases} 4,364 & si \quad Re < 2300 \\ \frac{\xi Re Pr}{1+12,7\sqrt{\frac{\xi}{8}}(Pr^{2/3}-1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] & si \quad Re \geq 10^4 \\ 4,364(1-\gamma) + \gamma \left[\frac{0,0308 Pr \cdot 10^4}{1+12,7\sqrt{\frac{0,0308}{8}}(Pr^{2/3}-1)} \left(1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right) \right] & si \quad 2300 < Re < 10^4 \end{cases} \quad (3.67)$$

En la ecuación L corresponde al largo del circuito [m] y Pr corresponde al número de Prandtl que es un número adimensional proporcional al cociente entre la velocidad de difusión de la cantidad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica y se puede determinar considerando el calor específico del fluido (c_p), su conductividad térmica [k_r] y su viscosidad [μ]:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k_r} \quad (3.68)$$

Los valores de ξ y γ dependen del número de Reynolds y se determinan con [25]:

$$\xi = (1,8 \log_{10} \cdot Re - 1,5)^{-2} \quad (3.69)$$

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} \quad (3.70)$$

Por otro lado, se estudian 2 tipos de intercambiadores horizontales de baja profundidad: los de lazo simple en que las tuberías se disponen en forma de línea recta con trayectoria serpentina y una variación correspondiente al sistema slinky en donde las tuberías forman un loop de tuberías superpuestas ubicándose en trincheras. En la siguiente imagen se puede observar la diferencia:



Lazo simple

Slinky

Figura 3.23: Intercambiadores de calor horizontal

Lazo simple

El espaciamiento adecuado para tuberías es de 0,5 a 0,8 [m] y de 1,2 a 1,5 [m] para tuberías con diámetros de 40 [mm]. La profundidad va a depender de las condiciones climáticas de la zona, sin embargo se recomienda una profundidad de entre 120 a 150 [cm].

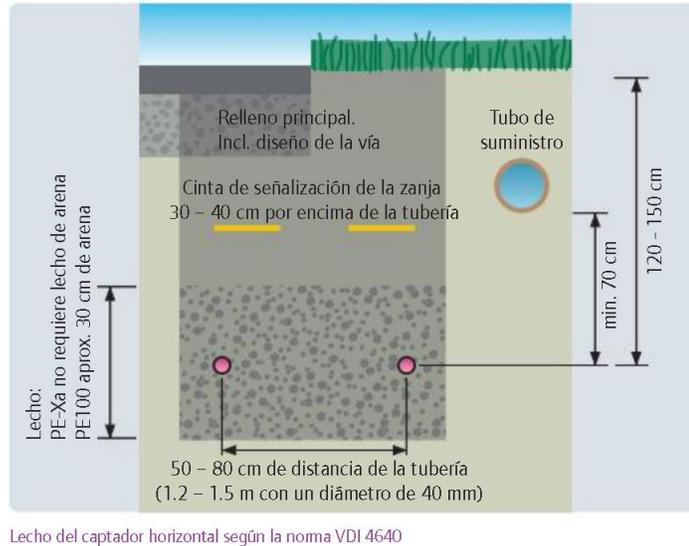


Figura 3.24: Lazo simple. Fuente: Manual técnico geotermia [56]

Según la norma VDI 4640 los circuitos de tuberías no deben superar una longitud máxima de 100 [m] y las conexiones horizontales de suministro y de retorno no deben superar una longitud de 30 [m] hasta la bomba de calor para no generar excesivas pérdidas de carga. Además, si no es posible instalar circuitos de la misma longitud, se deberá utilizar una compensación hidráulica mediante válvulas de equilibrado con el fin de mantener la misma pérdida de carga en cada circuito del captador [56].

Además, según norma DIN 4140-2 es recomendable aislar las líneas generales de alimentación y retorno de cualquier captador geotérmico [56].

Slinky

La configuración slinky es una variante del sistema horizontal, en donde la tubería se dispone en forma de bucles o espiras lo que permite instalar mayor longitud de tubería con la menor excavación posible.

El espaciamiento mínimo recomendado entre trincheras es de 15 ft (4,6 [m]) para la configuración slinky y de 10 [ft] (3 [m]) para slinky extendido [36]. A continuación se muestra la configuración slinky junto con la forma de cálculo para evaluar el largo efectivo de la trinchera en un sistema con loops:

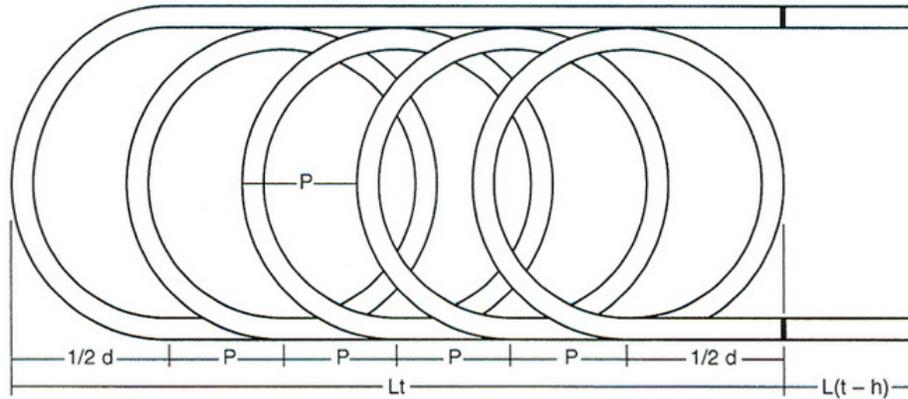


Figura 3.25: Parámetros de la geometría del sistema Slinky

$$L_p = N_l \cdot L_l + 2P \cdot N_l + \pi \frac{d}{2} + d \quad (3.71)$$

Donde L_p es el largo total de la tubería, N_l es el número de loops por trinchera, d es el diámetro del loop, L_l es el largo de cada loop equivalente al perímetro de la circunferencia (πd) y P es el espaciamiento entre loops.

El ancho de la trinchera debe ser mayor que el ancho del sistema loop, como mínimo, igual al diámetro de la espira más 35 [cm], mientras que la profundidad dependerá de las condiciones de diseño.

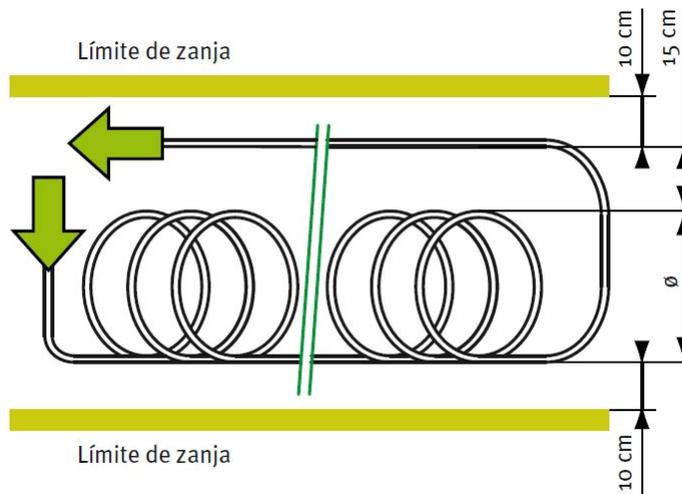


Figura 3.26: Esquema de la zanja horizontal slinky

3.3.2.3.2. Vertical cerrado

Un sistema de intercambio vertical cerrado consiste en una tubería de entrada y retorno hasta profundidades que van de los 50 a 150 [m]. Además, alrededor de este sistema de tuberías se pone un relleno de mortero con alta conductividad térmica con un diámetro de 0,12 a 0,15 [m].

El flujo de calor entre el suelo y el fluido de trabajo se produce a través del traspaso del suelo al mortero, de éste último a la tubería y finalmente al fluido. Para identificar la resistencia térmica de este sistema se pueden utilizar modelos de resistencia, diferenciando los casos en tubería simple (U) y doble (2U), tal como se muestra en la figura:

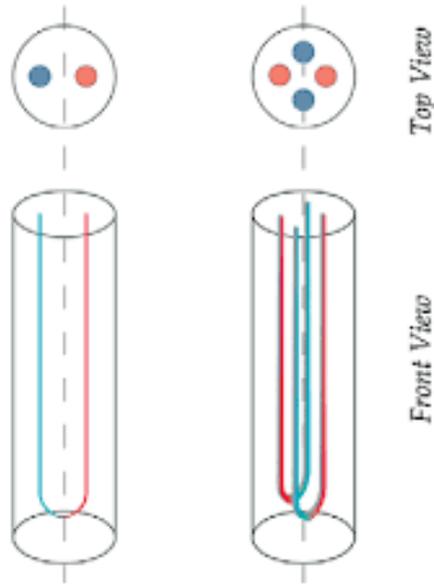


Figura 3.27: Perforación simple y doble U

Para determinar la resistencia térmica del conjunto de tuberías, mortero y refrigerante con el suelo se considerarán una serie de parámetros geométricos según [25]:

Vertical U

Corresponde a una perforación cilíndrica con 1 tubería de ingreso y 1 de salida formando una U y rodeada de mortero. Para esquematizar esta configuración se considera que está formada por 4 componentes:

- 1 tubería de ingreso i_1
- 1 tubería de salida o_1
- Mortero que se divide en 2 zonas $[g_1, g_2]$

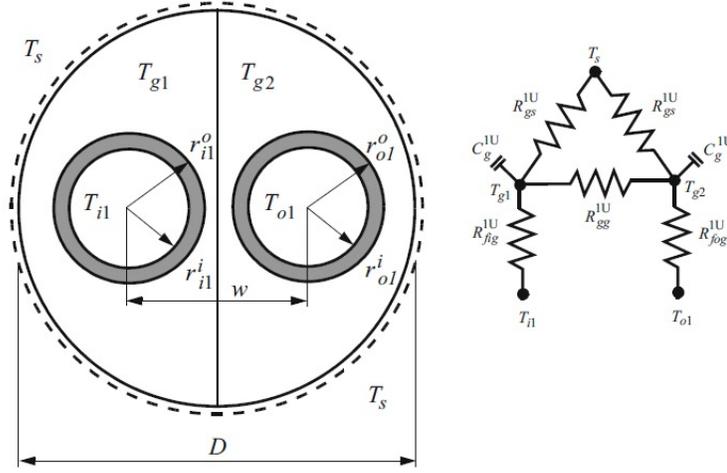


Figura 3.28: Resistencias en vertical U

La resistencia térmica del conjunto considera la resistencia conductiva del mortero R_{con_g} , la resistencia conductiva de la tubería R_{con_p} y la resistencia térmica advectiva R_{adv} del fluido:

$$R_{total}^{1U} = R_{adv}^{1U} + R_{con_g}^{1U} + R_{con_p}^{1U} \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.72)$$

La resistencia térmica conductiva de la tubería y advectiva del fluido se calcula de la misma forma que para los sistemas de captación horizontal.

Resistencia térmica conductiva del mortero

La resistencia efectiva del mortero considera un factor de corrección (x) que depende de la configuración geométrica en que se dispongan los tubos dentro de la sección anular y se determina con:

$$R_{con_g}^{1U} = x^{1U} \cdot R_g^{1U} \quad (3.73)$$

La resistencia del mortero es:

$$R_g^{1U} = \frac{\text{arcosh} \left(\frac{D^2 + d_o^2 - w^2}{2Dd_o} \right)}{2\pi k_g} \left(1,601 - 0,888 \frac{w}{D} \right) \quad (3.74)$$

Siendo D el diámetro de la perforación, d_o el diámetro exterior promedio de las tuberías, w la distancia entre los centros de las tuberías según Figura 3.28 y k_g es la conductividad térmica del mortero.

Y el factor de corrección es:

$$x^{1U} = \frac{\ln \left(\frac{\sqrt{D^2 + 2d_o^2}}{2 \cdot d_o} \right)}{\ln \left(\frac{D}{\sqrt{2} \cdot d_o} \right)} \quad (3.75)$$

Vertical 2U

Corresponde a una perforación cilíndrica con 2 tuberías de ingreso y 2 de salida formando una doble U y rodeado de mortero. Para esquematizar esta configuración se considera que está formada por 8 componentes:

- Dos tuberías de ingreso [i_1 e i_2]
- Dos tuberías de salida [o_1 e o_2]
- Mortero que se divide en 4 zonas [g_1, g_2, g_3, g_4]

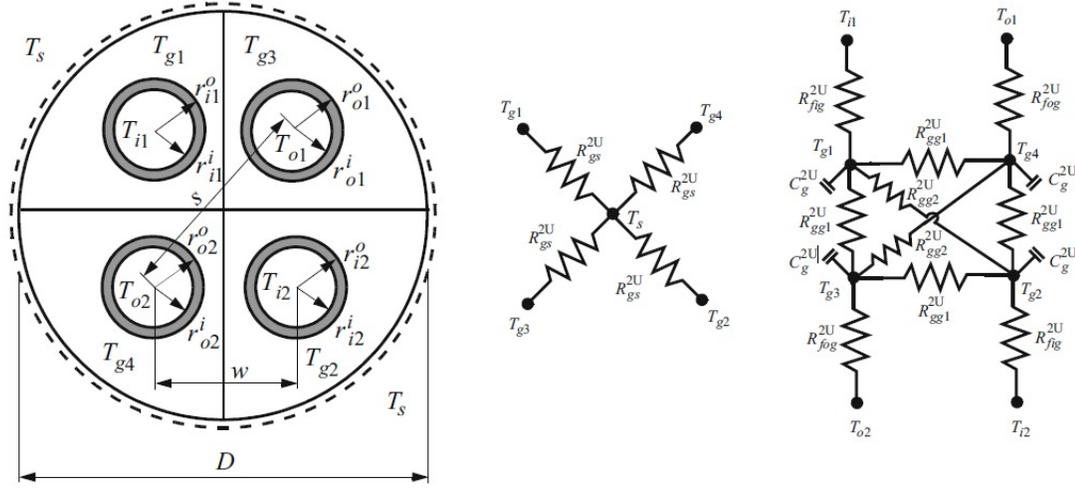


Figura 3.29: Resistencias en vertical 2U

La resistencia del conjunto es similar al caso de tubería en U simple, solo que ahora los parámetros geométricos serán distintos.

$$R_{total}^{2U} = R_{adv}^{2U} + R_{con_g}^{2U} + R_{con_p}^{2U} \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.76)$$

Entonces, la resistencia advectiva y la conductiva de las tuberías se calcula igual pero la resistencia del conjunto del mortero considera se calcula con:

$$R_{con_g}^{2U} = x^{2U} \cdot R_g^{2U} \quad (3.77)$$

La resistencia del mortero es:

$$R_g^{2U} = \frac{\text{arcosh} \left(\frac{D^2 + d_o^2 - s^2}{2Dd_o} \right)}{2\pi k_g} \left(3,098 - 4,432 \frac{s}{D} + 2,364 \frac{s^2}{D^2} \right) \quad \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (3.78)$$

Siendo D el diámetro de la perforación, d_o el diámetro exterior promedio de las tuberías, $s = w\sqrt{2}$ corresponde a la distancia diagonal de las tuberías y k_g es la conductividad térmica de la lechada.

Y el factor de corrección es:

$$x^{2U} = \frac{\ln\left(\frac{\sqrt{D^2+4d_o^2}}{2\sqrt{2}d_o}\right)}{\ln\left(\frac{D}{2d_o}\right)} \quad (3.79)$$

Configuración

Para identificar la separación adecuada entre intercambiadores verticales abiertos se utiliza el método descrito anteriormente para incluir el efecto de perforaciones cercanas a la resistencia térmica.

La tendencia habitual o regulada en países donde esta tecnología es común es ubicar las perforaciones a una distancia del orden de 10 [m] siendo el mínimo recomendado de 6 [m]. Por ejemplo, en el estado Alemán de Baden-Würtemberg la distancia sugerida para intercambiadores de calor verticales es 10 [m], mientras que en Suiza se recomiendan 6-8 [m] de separación [40].

3.3.3. Intercambiador de calor vertical abierto

Un sistema abierto de calefacción o refrigeración utiliza agua subterránea (pozo), para lo cual se requerirá de la presencia de un acuífero. Un acuífero es un cuerpo o estrato de roca o sedimento que presenta una conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento tales que permiten la explotación económica del agua, en el contexto de estudio el acuífero debe entregar el agua requerida para la demanda del sistema de calefacción o refrigeración.

Entonces no es posible construir un pozo de extracción de agua en cualquier lugar, el criterio general es que se necesita un acuífero, un cuerpo permeable de roca o sedimento en la subsuperficie que tenga una adecuada transmisividad y propiedades de almacenamiento que le permitan mantener un flujo constante y extraíble de agua subterránea [50].

Debido a esto, se requiere un estudio hidrogeológico local y la perforación de, al menos, dos pozos, de extracción y de reinyección, en los que se realicen ensayos hidráulicos para comprobar que no se vean interferidos entre ellos hidráulica y térmicamente, reduciendo la eficiencia del sistema. Además se requiere de ensayos de calidad del agua, para evitar problemas de corrosión, sarro y colmatación de tuberías y conducciones, que puedan afectar al funcionamiento de la instalación a largo plazo [17].

Para compensar el abatimiento de un pozo de extracción es necesario incluir un pozo de reinyección suficientemente alejado para evitar interferencias térmicas. Tal como se muestra en la figura 3.31 el pozo de reinyección actúa como un foco de abatimiento negativo que compensa la extracción realizada por el primer pozo.

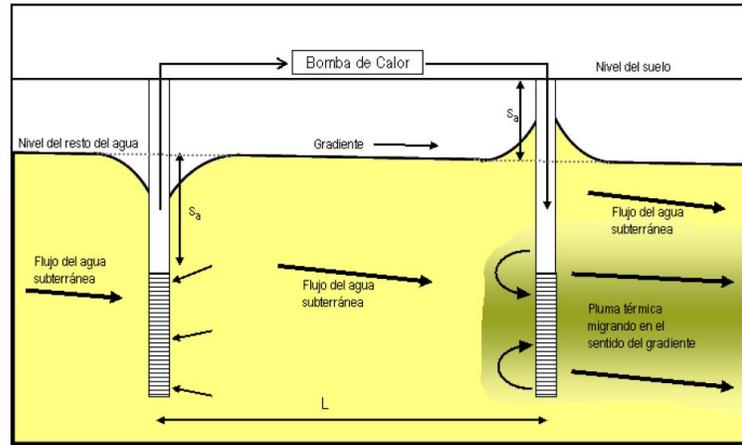


Figura 3.30: Pozo de extracción y reinyección [50]

Dentro de las ventajas de los sistemas abiertos se encuentra que son los menos costosos de los sistemas de captación geotérmica, requieren de la menor superficie y dado que el fluido mismo es el que realiza el intercambio térmico, se presentan mayores eficiencias.

Sin embargo, dentro de las principales desventajas se tiene que dependen de la geología pues requieren un acuífero en profundidad capaz de proveer el rendimiento requerido. Además se incurre en costos de bombeo del agua subterránea, los que en todo caso no debieran exceder el 10 % de la energía total consumida considerando la bomba de calor.

Otro aspecto a tener en cuenta en la fase de estudios previos, es el de las autorizaciones para captación de aguas subterráneas, debido a que se antepone el abastecimiento de agua potable a las poblaciones para consumo humano a la captación con fines de climatización de edificios. Y también generan un flujo de agua que requiere una autorización para ser desechado.

3.3.3.1. Diseño de sistemas abiertos

Para dimensionar un pozo de captación los 3 parámetros más relevantes son:

- **Profundidad del pozo:** este dependerá de la profundidad del acuífero, el nivel freático en el acuífero y su conductividad hidráulica. Los pozos pueden tener unos pocos metros de profundidad en depósitos aluviales superficiales o se pueden extender a profundidades de varios cientos de metros.
- **Diámetro del pozo:** este dependerá del rendimiento del pozo, lo que a su vez determinará el diámetro de la bomba requerida, la cual debe tener el espacio suficiente para trabajar cómodamente al interior del pozo.
- **Rendimiento del pozo:** éste se calcula según las propiedades hidráulicas del acuífero y la demanda térmica en calefacción y/o de refrigeración que se desea cubrir.

El caudal requerido por el pozo se calcula considerando el salto térmico ΔT , el calor específico del agua subterránea c_p [J/kg °C] y el calor que se necesita extraer del suelo Q_{suelo} en [W]:

$$\dot{m} = \frac{Q_{suelo}}{c_p \cdot \Delta T} \quad [kg/s] \quad (3.80)$$

Según el caudal necesario se puede determinar el diámetro mínimo de la tubería de extracción y el máximo de la bomba [46]:

Tabla 3.6: Diámetro requerido por bomba y tubería en función del caudal de extracción

Caudal [l/s]	Diámetro máximo bomba [in]	Diámetro mínimo tubería [in]
0-10	5	6
9-24	6	8
21-40	8	10
36-80	10	12
72-110	12	14
98-180	14	16

3.3.3.2. Equipos auxiliares

Dado que el agua de pozo puede contener partículas que dañen o desgasten las tuberías de la bomba de calor y minerales que precipiten en el equipo, se puede optar por un segundo intercambiador de calor entre las aguas subterráneas y la bomba de calor, utilizando un intercambiador de placas que proteja a la bomba de la exposición directa con el agua. Tal como se muestra en la figura:

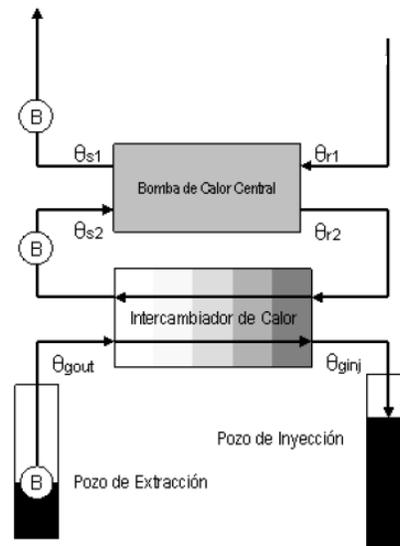


Figura 3.31: Intercambiador de placas en sistema de captación abierto [50]

Esta estrategia puede generar que el problema de precipitación ocurra en el intercambiador, pero esto es mucho más económico que generar el problema en la misma bomba de calor. Además, el riesgo de atascamiento de partículas se puede reducir por medio de filtros removibles antes de llegar al intercambiador.

Los intercambiadores de placa constan de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados para el flujo. Los fluidos caliente y frío fluyen en pasos alternados, de este modo cada corriente de fluido frío queda rodeada por dos corrientes de fluido caliente, lo que da por resultado una transferencia muy eficaz de calor.

Asimismo, este tipo de intercambiadores pueden crecer al aumentar la demanda de transferencia de calor sencillamente montando más placas. Resultan muy apropiados para aplicaciones de intercambio de calor de líquido hacia líquido, siempre que las corrientes de los fluidos caliente y frío se encuentren más o menos a la misma presión.

3.4. Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica del proyecto se considera el costo nivelado de energía (LCOE) que calcula el valor presente del costo total de construcción y operación de una planta de energía durante una vida útil propuesta. Mide los costos totales que esa instalación tendrá a lo largo de toda su vida y los divide por la producción de energía que realizará también durante todos sus años de operación. Se calcula según la siguiente ecuación:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3.81)$$

Donde I_t es la inversión [\$], M_t son los costos asociados a la mantención [\$], F_t costos de operación [\$], E_t la energía producida [kW], r la tasa de descuento [%] y n corresponde al tiempo de vida del proyecto [años].

- Costo de inversión (I): es la suma del costo por materiales, el costo de construcción, instalación, transporte y el costo por ingeniería. Se puede estimar que el costo por construcción, instalación y transporte es el 30 % del costo por materiales y el costo por ingeniería es el 15 % del costo por materiales, construcción, instalación y traslado [4].
- Costo por mantenciones (M): se asume que todos los años tienen el mismo costo por mantención. Estos se deben reajustar según en qué año se realicen, utilizando el costo por mantención actual y reajustando con la tasa de descuento.
- Costos operacionales (F): en un proyecto de calefacción con geotermia únicamente se considera el consumo eléctrico de los equipos como costos operacionales. Se reajustan con la tasa de descuento, y con la tasa de escalamiento. Se asume una tasa de escalamiento del 1 % para la energía eléctrica.

Capítulo 4

Desarrollo

En esta sección se presenta la metodología y los parámetros a utilizar para el dimensionamiento de los sistemas en todos los casos de estudio en los que se utilizan las ecuaciones descritas en la sección anterior. Se presentan además los resultados parciales de cada área de estudio.

4.1. Vivienda

4.1.1. Cargas térmicas

Para determinar las cargas térmicas de la vivienda, en primer lugar se tomó contacto con la municipalidad de Cochrane para solicitar planos de una vivienda típica de la zona [11]. Esto se hizo para considerar la tipología y superficie típica de la zona, sin embargo, tal como se indicó antes, dado que la mayoría de las viviendas no cumplen con la reglamentación térmica, se utilizan los valores de transmitancia térmica (U) de una vivienda energéticamente eficiente.

Con los planos se deben identificar las superficies de los elementos constructivos según orientación:

Tabla 4.1: Superficie de elementos según orientación

Superficie de cada elemento [m^2]			
	Muros	Puerta	Techo
Norte	10,44	1,8	-
Sur	13,44	-	-
Este	24,96	1,8	42,1
Oeste	25,46	-	42,1

Con respecto a las ventanas, además se evalúa el % de ventana con respecto a la superficie del muro para evaluar si el valor se ajusta a la reglamentación:

Tabla 4.2: Superficie de ventana según orientación

	Superficie ventana [m^2]	% Ventana
Norte	2,4	16 %
Sur	1,2	8 %
Este	1,2	4 %
Oeste	2,5	9 %

En todas las orientaciones se mantiene un porcentaje de ventana por debajo del máximo permitido.

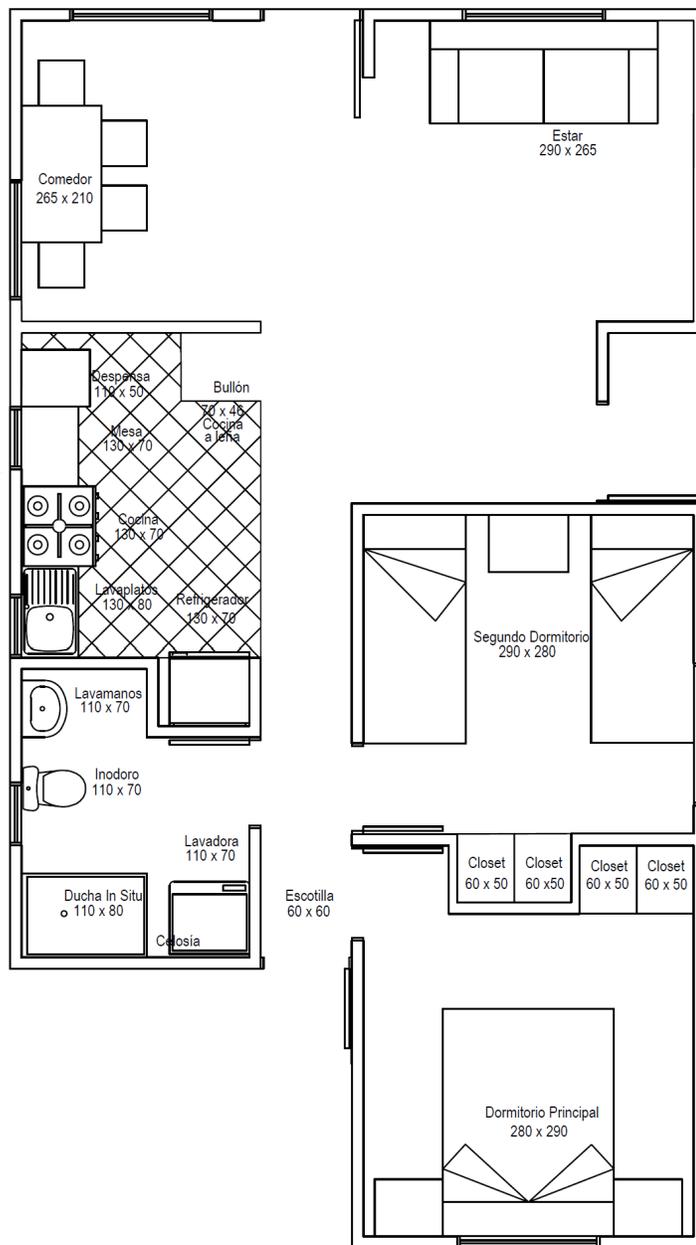


Figura 4.1: Plano vivienda de Cochrane

El área total de la vivienda es de 58 [m^2], valor que coincide con lo esperado según superficie

típica de la zona. El perímetro es de 35,5 [m].

Luego se buscan los datos climatológicos de la zona utilizando el Explorador Solar, identificando las temperaturas hora a hora para 1 año completo y se consideran las temperaturas promedio para cada hora de cada mes:

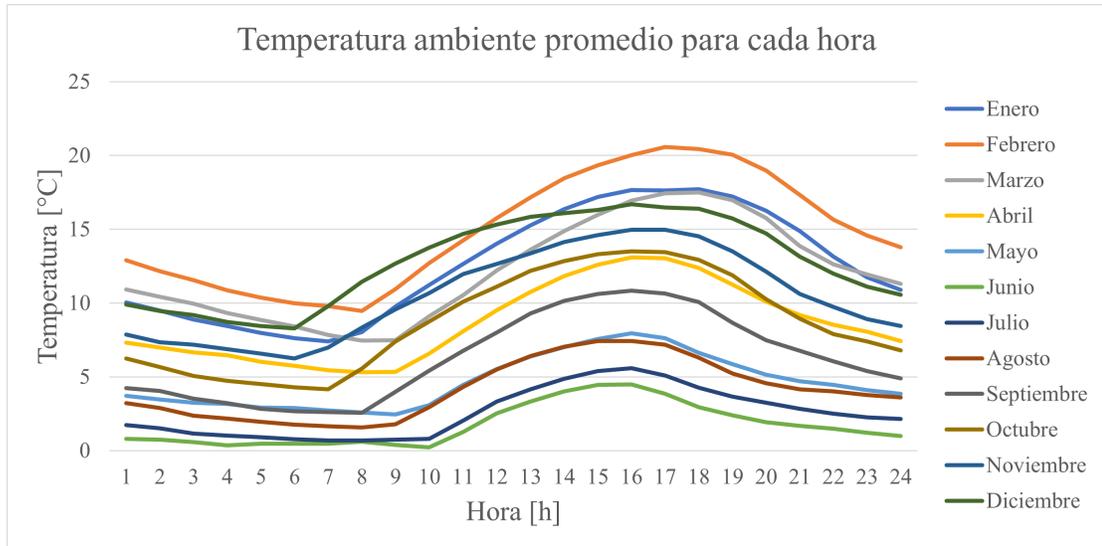


Figura 4.2: Temperatura promedio en Cochrane

La temperatura promedio anual es de $T_m = 8,3$ [°C] con una amplitud máxima de $T_p = 5,5$ [°C].

Además, se identifica la velocidad promedio del viento para cada hora-mes y la velocidad promedio anual igual a 2,5 [°C].

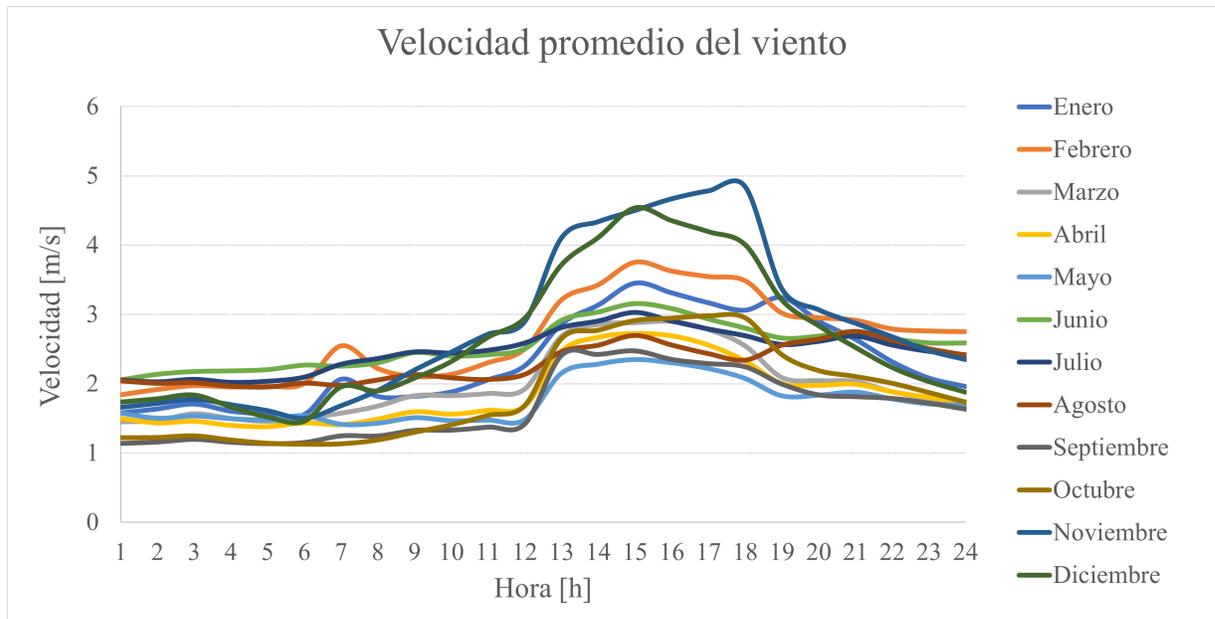


Figura 4.3: Velocidad del viento

Cargas por transmisión

Para el cálculo de las cargas por transmisión se considera una reducción del 10 % en los coeficientes globales de transferencia recomendados para mejorar la aislación de la vivienda. Esta reducción se debe realizar en zonas donde existe un plan de descontaminación ambiental (PDA) [23] y a pesar de que Cochrane no pertenece a este plan actualmente, se justifica esta decisión por los altos niveles de material particulado.

Tabla 4.3: Transmitancias máximas para zona térmica del sur extremo

Elemento constructivo		Transmitancia [W/m^2K]	Transmitancia con reducción de 10 % [W/m^2K]
Muro	U_m	0,35	0,315
Ventanas	U_v	2,4	2,16
Techo	U_t	0,25	0,225
Piso	U_p	0,31	0,279
Piso lineal*	k_p	0,04	0,036
Puertas	U_{pu}	1,7	1,53

Con estos valores y las dimensiones de los elementos constructivos de la vivienda escogida, las cargas por transmisión equivalen a 78,9 [W/K]. Este valor se debe multiplicar luego por la diferencia de temperatura exterior y la de confort para obtener las pérdidas térmicas debido a transmisión en potencia de calefacción [W].

A continuación se muestra el comportamiento de las cargas por transmisión para el mes de Junio:

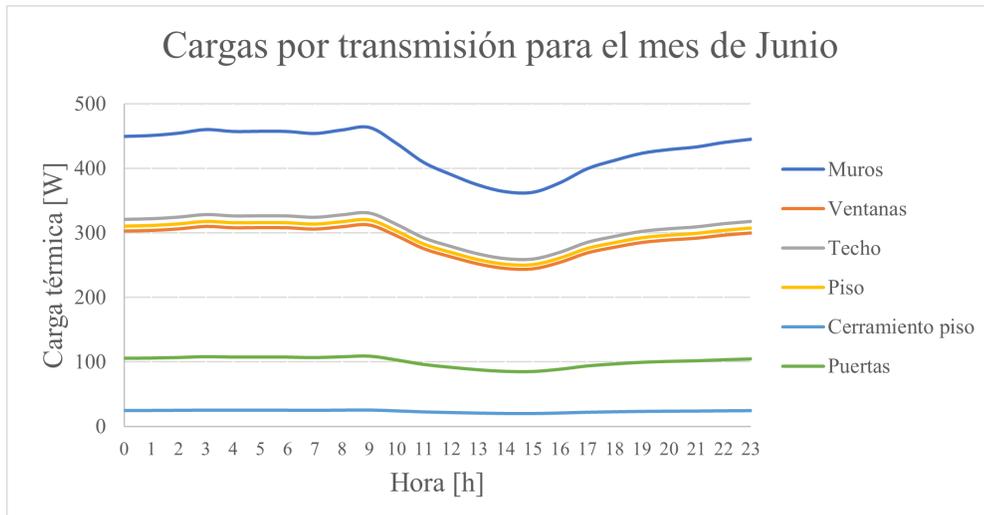


Figura 4.4: Cargas por transmisión en los distintos elementos constructivos para el mes de Junio

Se debe destacar que al calcular las pérdidas por transmisión a través de las ventanas

no se considera el uso de elementos aislantes como las cortinas. Por lo que este valor está levemente sobredimensionado.

Pérdidas por ventilación

Para las cargas por ventilación en primer lugar se calcula el volumen de la vivienda. Dado que la vivienda tiene una altura de 2,4 metros y una superficie de 58 $[m^2]$, el volumen total es de 139 $[m^3]$.

Según información de la Tabla 3.1, para zona térmica SE se debe considerar 2 ACH, sin embargo, según criterio USO este valor podría ser de 1,4 ACH. Por lo que se determina que 1,5 ACH es un parámetro de cálculo adecuado y está por sobre lo recomendado de 1 ACH por concepto de salubridad.

Tabla 4.4: Parámetros de entrada para pérdidas por ventilación

Datos de entrada		
Renovaciones de aire	1/h	1,5
Densidad aire	kg/m^3	1,2
Calor específico	J/kg C	1005
Volumen vivienda	m^3	139,2

Esto equivale a un flujo volumétrico de 0,05802 m^3/s . Para determinar las cargas por ventilación se debe considerar la diferencia de temperatura exterior y de confort. A continuación se muestra el comportamiento para el mes de Junio (invierno) y Enero (verano):

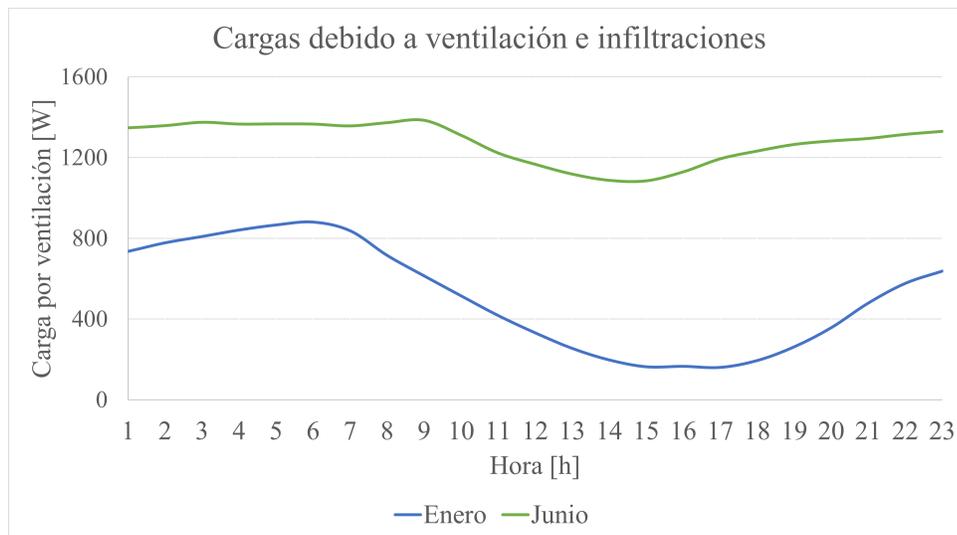


Figura 4.5: Cargas por ventilación horarias para el mes de Junio y Enero

Se debe mencionar que efectivamente, el volumen total de la vivienda debe ser un poco menor, debido al espacio utilizado por muebles y electrodomésticos. Por lo que las pérdidas por ventilación pueden estar levemente sobredimensionadas.

Ganancias solares

Para obtener la radiación solar incidente a cada hora en la cada elemento constructivo se utiliza el Explorador Solar y se varía la inclinación de estudio y el ángulo azimut. Los ángulos azimut según dirección que se deben ingresar al Explorador Solar son:

Tabla 4.5: Ángulo azimut según orientación de la fachada

Orientación	Azimut
Sur	180°
Norte	0°
Este	-90°
Oeste	90°

Para los elementos con inclinación vertical (90°) se tiene:

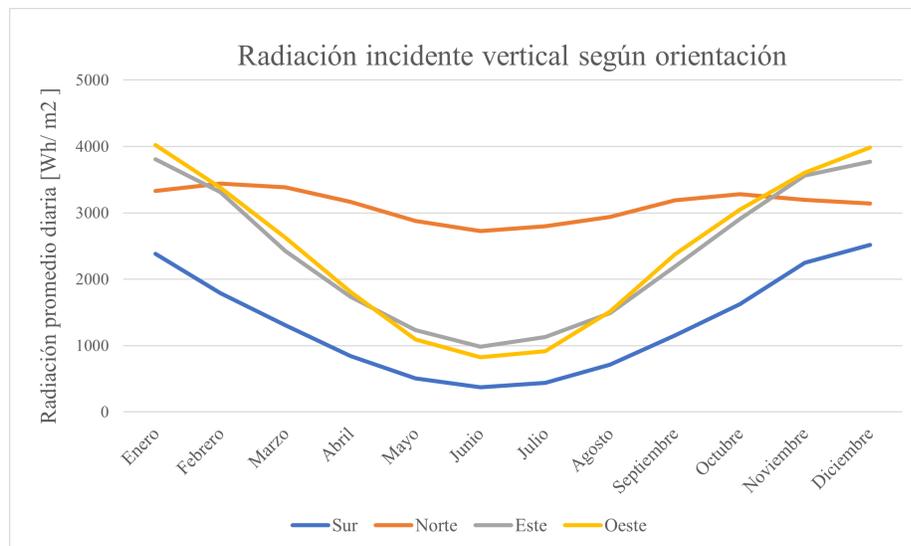


Figura 4.6: Radiación promedio diaria en Cochane según orientación en superficie vertical

Para la radiación incidente en el techo de la vivienda se considera un ángulo de inclinación de 25° según planos entregados por municipalidad. Con lo que se obtuvo:

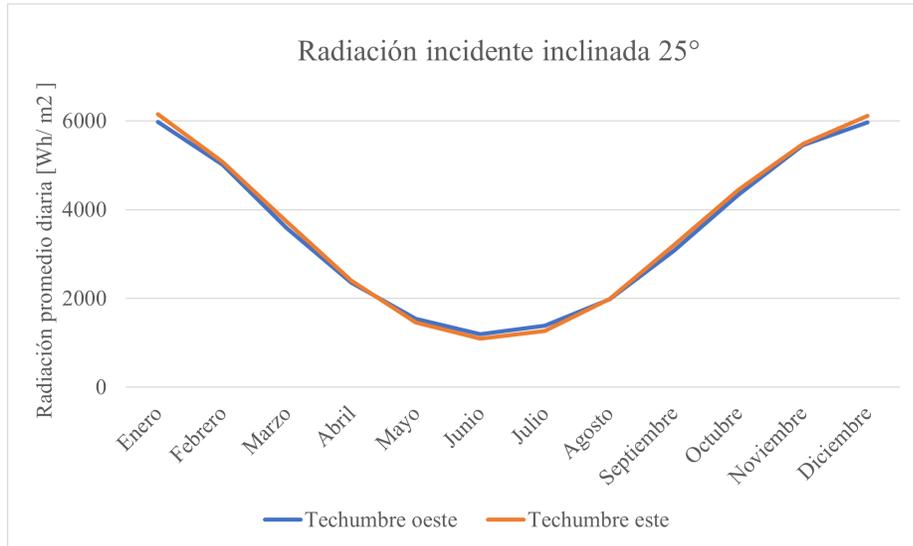


Figura 4.7: Radiación promedio diaria en superficie inclinada 25°

Aunque la radiación promedio diaria en el techo orientado al este y al oeste es casi idéntica, estos valores difieren a lo largo del día debido al movimiento del sol. Para mostrar esto a continuación se observa la radiación promedio por hora para el mes de diciembre:

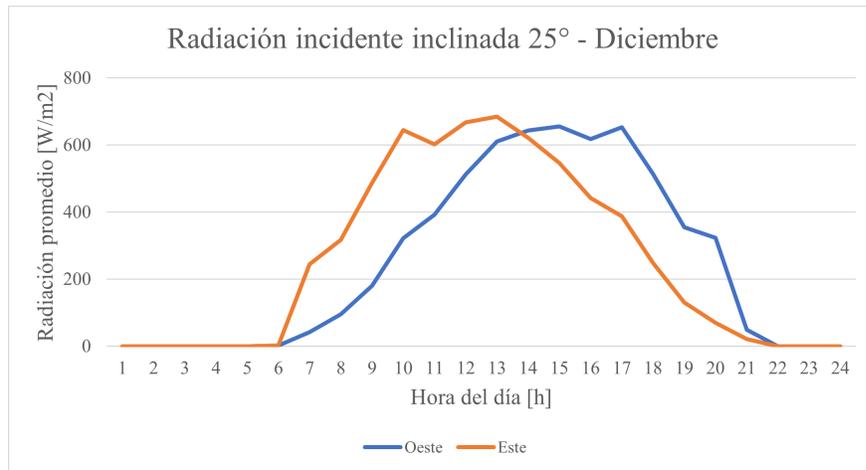


Figura 4.8: Radiación promedio horaria en superficie inclinada 25°.

Una vez que se tiene la radiación incidente en distintas orientaciones e inclinaciones, se estudian las características de los elementos opacos y translúcidos.

Elementos translúcidos

Los elementos translúcidos son las ventanas cuyas propiedades son:

Tabla 4.6: Propiedades de elemento translúcido [8]

	Ventanas
Material	Vidrio
FM	0,75
Transmisividad	0,895
(1-FS)	0,13

Elementos opacos

Las áreas de cada elemento según orientación son las que se detallaron antes, no se incorpora el efecto sombra de los aleros. Para evaluar las ganancias radiativas se consideran los materiales de la fachada exterior de la vivienda:

Tabla 4.7: Propiedades de elementos opacos [8]

	Muros	Puertas	Techo
Material fachada	Madera	Madera	Ladrillo rojo
Absorbancia α	0,6	0,6	0,77
Transmitancia [W/m^2K]	0,315	1,53	0,225

Para el cálculo del coeficiente convectivo h_c se utiliza la velocidad promedio del viento para cada hora (Figura 4.3) y para el coeficiente radiativo en cada superficie h_r se puede determinar considerando la temperatura ambiente, una emisividad de 0,5 para elementos opacos y que la constante de Stephan Boltzmann es de $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m^2K^4].

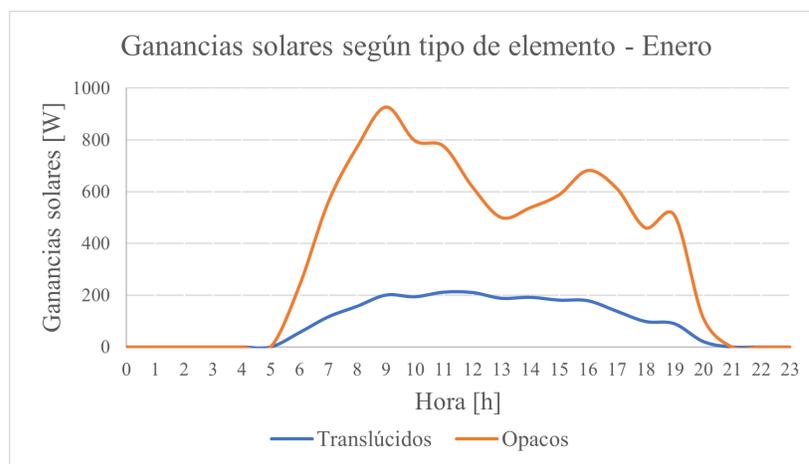


Figura 4.9: Ganancias solares según tipo de elemento

En la figura se puede observar que las ganancias solares son principalmente debido a los elementos opacos.

Ganancias internas

Dado que la vivienda en estudio cuenta con 2 habitaciones se utiliza el criterio de 2 personas más 1 por habitación extra, resultando en el dimensionamiento de 3 personas por vivienda. Este valor coincide con lo esperado según estudio censal de Cochrane, donde se estableció un promedio de 2,5 habitantes por vivienda.

Se considera además, que todos los días son iguales para efectos de la ocupación de la vivienda, sin hacer distinción de días de semana o fines de semana. Aún así, sí se consideran las fracciones de ocupación a lo largo del día. Dado que este valor no depende de las condiciones ambientales, no variará a lo largo de los meses pero sí a lo largo del día según:

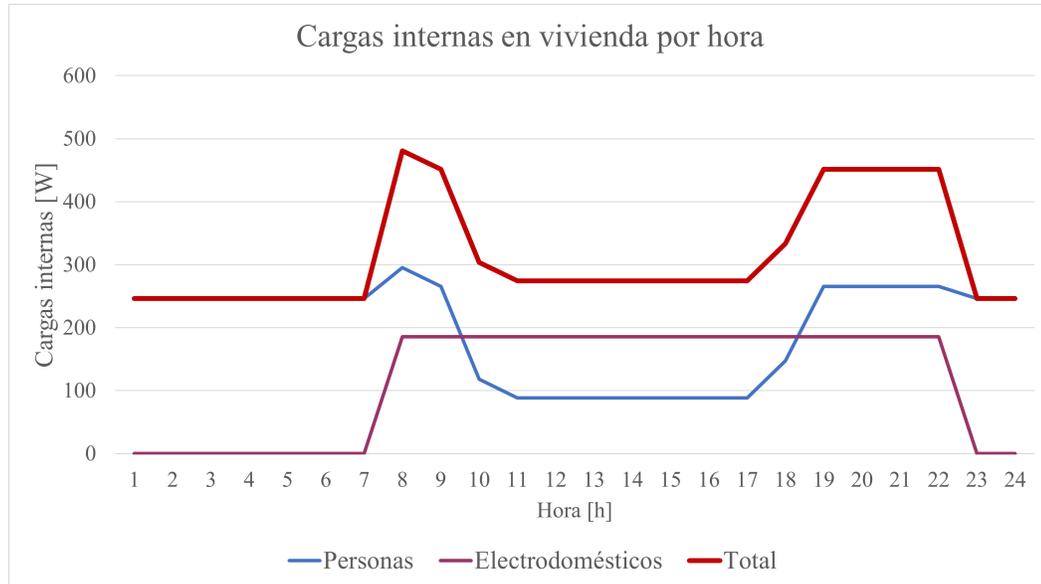


Figura 4.10: Cargas internas en la vivienda

Carga de diseño

Para determinar la carga de diseño se realiza el balance energético para cada hora. Para esto se evalúan 3 escenarios: en el primero se pretende calefaccionar las viviendas siempre que lo requieran, es decir, mantener la temperatura de confort las 24 horas del día. En el segundo escenario se evalúa calefaccionar a 20 °C durante el día, mientras que en la noche se podría operar con una temperatura de 17°C. En el último escenario solo se calefacciona de día, es decir que las personas apagan el sistema de calefacción durante la noche.

Tabla 4.8: Horas de funcionamiento y potencia de calefacción por vivienda

Caso de estudio	Caso A	Caso B	Caso C
	24 hrs a 20°C	18 hrs a 20°C 6 hrs a 17°C	18 hrs 20°C
Demanda máxima calefacción [W]	2678	2626	2659
Demanda 95 % [W]	2544	2495	2526
% de cumplimiento de demanda	95 %	99 %	98 %
Horas de funcionamiento anual [h]	4237	3748	2564
Fracción de ocupación BCG	0,46	0,42	0,28

Para escoger entre los casos se debe considerar que el recurso energético es en base a geotermia, y la recomendación de diseño alemana da valores referenciales de 1800 y 2400 horas de utilización anual de distintos suelos, debido a que una sobrecarga del suelo hace que el desempeño geotérmico sea menor [52], por lo que se determina que el sistema solo abastecerá de calefacción durante del día (Caso C).

Entonces, la carga máxima de cada vivienda es de 2669 [W] y considerando un factor de cumplimiento de la demanda del 95 % la carga de diseño de una vivienda es de 2526 [W] con una fracción de ocupación $F_c = 0,28$.

Teniendo la carga de diseño se puede comenzar a dimensionar el sistema de calefacción por suelo radiante o radiador de baja temperatura:

4.1.2. Suelo radiante

Para la calefacción mediante suelo radiante, se considera 1 circuito de tuberías por cada habitación con configuración en espiral, donde el fluido de trabajo es agua a 35 °C y el salto térmico es de 5°C. Dado que son 6 habitaciones, se tiene 6 tuberías independientes que se conectan a un colector hidráulico con 6 vías de entrada y 6 de retorno.

A pesar de que puede ser útil considerar un intercambiador de calor de placas en cada vivienda, para que el circuito sea independiente, se opta porque el fluido de trabajo del sistema de calefacción central sea el mismo que se distribuye por la red de distribución de la planta de generación.

La superficie a cubrir por los circuitos de tuberías es menor a la superficie total del piso dado que no se realiza la instalación en zona de lavaderos, tina o ducha, baño, closet y bajo muebles y equipos de cocina. Por lo que las áreas útiles a cubrir son:

Tabla 4.9: Datos de vivienda a considerar para suelo radiante

	Circuito	Área [m²]
Cocina	1	5,67
Baño	2	3,74
Pieza principal	3	6,5
Pieza 2	4	6,5
Living	5	10,47
Comedor	6	6,72
Total		39,6

Luego se identifica el flujo de calor máximo por habitación, considerando que en zona de baño y cocina se tiene baldosa de cerámica y en las zonas de estar piso flotante.

Tabla 4.10: Flujo de calor máximo por habitación

Circuitos	Baño y cocina		Estar			
	1	2	3	4	5	6
T° impulsión [°C]	35		35			
T° retorno [C]	30		30			
T_{máx} piso [°C]	35		29			
T°_{set} [°C]	20		20			
q_{máx} [W/m²]	163		93			

Se establece la siguiente composición y características del sistema de suelo radiante [4]:



Figura 4.11: Elementos del piso radiante

Tabla 4.11: Componentes del piso radiante [4]

Elemento	Espesor [m]	Conductividad térmica [W/mK]	Resistencia térmica [m^2K/W]
Mortero	0,045	1,4	0,032
Tubería PEX-A	0,02	0,36	0,056
Poliestireno expandido	0,05	0,038	1,316
Polietileno	0,002	0,45	0,004
Radier	0,1	1,7	0,059
Arena compacta	0,1	1,28	0,078
Roca compacta	0,15	3,5	0,043

Con respecto al revestimiento, las propiedades de la cerámica y piso flotante son:

Tabla 4.12: Propiedades de revestimiento [4]

Revestimiento	Cerámica	Piso flotante
Resistencia térmica [m^2K/W]	0,005	0,010
Espesor [m]	0,008	0,008
Conductividad [W/mK]	1,75	0,81

Luego, se calculan los factores adimensionales considerando un espaciamiento de 15 [cm] entre tuberías. Los factores adimensionales a dependen del revestimiento y los m dependen del espaciamiento de las tuberías. Con los factores adimensionales y las temperaturas de operación se calcula el flujo de calor:

Tabla 4.13: Flujo de calor para revestimiento de cerámica y piso flotante

Tuberías	PEX-A	
Separación [m]	0,15	
Diámetro exterior [m]	0,02	
S_u [m]	0,053	
Factores adimensionales		
Revestimiento	Cerámica	Piso flotante
a_B	1,12	0,87
a_T	1,23	1,22
a_u	1,056	1,055
a_D	1,039	1,038
m_T	-1	-1
m_u	-0,8	-0,8
m_D	0	0
Flujo de calor q [W/m^2]	88,5	68,94

En ambos casos se cumple que el flujo de calor está por debajo del máximo permitido por seguridad ($q < q_{máx}$).

Con las propiedades de los componentes del piso radiante se determina la resistencia térmica del sistema a la transferencia de calor al suelo de la vivienda (hacia arriba) y la resistencia a la transferencia de calor por disipación hacia el suelo (hacia abajo).

Tabla 4.14: Resistencias térmicas sobre y bajo tuberías

Resistencia térmica [m^2/KW]	Cerámica	Piso flotante
R_o (sobre tubería)	0,134	0,143
R_u (bajo tubería)	1,5	1,5

Se pudo determinar que con los valores y materiales escogidos la resistencia térmica de la capa inferior es 10-11 veces más alta, es decir tiene una baja conductividad térmica actuando como aislante para evitar que el calor generado se disipe al suelo. Mientras que los materiales de la capa superior tienen una resistencia térmica baja R_o lo cual permite que el calor se transfiera fácilmente al piso de la vivienda.

Con estos valores de resistencias superior e inferior se calcula el flujo másico de agua que debe circular por cada circuito (Ecuación 3.26). Y con el flujo másico se puede calcular las pérdidas de carga regulares y singulares para poder escoger la bomba que cumpla con ambos requerimientos. Para esto se consideran las propiedades de las tuberías y el fluido:

Tabla 4.15: Propiedades de la tubería y fluido en suelo radiante

Propiedad	Valor
Rugosidad PEX-A	7E-06
Diámetro interno [m]	0,016
Viscosidad dinámica [kg/ms]	0,00072
Densidad agua 35°C [kg/m^3]	994,1

Con estos valores se calculan las pérdidas de carga regulares en cada circuito y se estiman las pérdidas secundarias debido a accesorios como un 30 % del valor de las pérdidas regulares según norma UNE 149201 [18]:

Tabla 4.16: Caudal y pérdida de carga en suelo radiante

Circuitos	Baño y cocina		Estar			
	1	2	3	4	5	6
Caudal [l/min]	1,4	0,95	1,3	1,4	2,1	1,34
Largo total [m]	39	30	50	49	74	49
Pérdida de carga regular [m.c.a]	0,036	0,027	0,055	0,055	0,128	0,037
Pérdida de carga secundarias [m.c.a]	0,011	0,008	0,017	0,017	0,038	0,011
Pérdida de carga total [m.c.a]	0,047	0,035	0,072	0,072	0,166	0,048

Dado que los circuitos operan en paralelo, la pérdida de carga corresponde a la pérdida máxima de entre los circuitos. Al incorporar la carga por el paso por el colector (0,1 [kPa]) la pérdida de carga total es de 0,18 [m.c.a].

El caudal es la suma de los caudales de cada circuito e igual a 8,4 [l/min]. Con estos valores se escoge bomba circuladora de caudal variable de la marca Grundfos ALPHA3.

Finalmente, para escoger el vaso de expansión se calcula el volumen de fluido total de la instalación, correspondiente al que está dentro de los 6 circuitos. La presión máxima y mínima en este tipo de sistema es de 9 y 1,5 [bar] respectivamente [4].

Tabla 4.17: Dimensionamiento vaso expansión

Volumen fluido tubería [l]	67,6
Ce	0,048
Cp	0,857
Volumen vaso expansión [l]	2,8

4.1.3. Radiadores

Para el uso de radiadores se escogen circuitos trabajando en paralelo nuevamente, para lo cual se trabaja con tuberías multicapa con el fluido de trabajo que viene directamente de la red de distribución (agua). Las tuberías se disponen empotradas a pared y suelo, con un diámetro de 20 [mm] por lo que el espesor de aislante necesario según Tabla 3.3 es de 20 [mm].

A diferencia del caso anterior, los radiadores de baja temperatura pueden operar a temperaturas más altas, disminuyendo su consumo y disminuyendo también el área de intercambio necesario y por lo tanto, se pueden usar radiadores más pequeños al aumentar la temperatura de entrada.

Debido a lo anterior, se dimensionan y analizan 2 casos para los radiadores: calefaccionar con agua de muy baja temperatura a 35°C y un salto térmico de 5 °C y trabajar con agua a 55°C y un salto térmico de 10°C.

Dado que los radiadores se deben ubicar bajo las ventanas, según planos y disposición de los elementos de la vivienda, se propone la siguiente distribución utilizando un colector, donde cada línea en realidad corresponde a una línea de ida y otra de retorno:

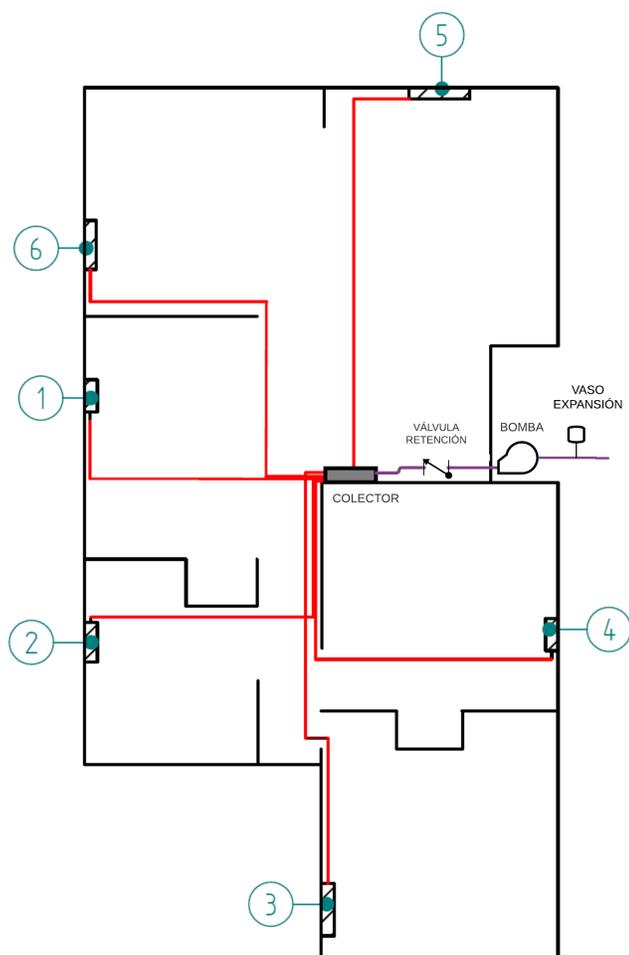


Figura 4.12: Esquema ubicación de radiadores en vivienda

Además, como se calculó la carga térmica asociada a la vivienda completa equivalente a 2526 [W] se debe establecer cómo se distribuirá la potencia de cada radiador en la vivienda. Para esto se determinan las áreas útiles de cada habitación y se determina el porcentaje con respecto al área útil total, esto con el objetivo de determinar la potencia proporcional de cada habitación según su área:

Tabla 4.18: Datos de vivienda a considerar para radiadores

	Circuito	Área útil [m ²]	% de la superficie útil	Potencia proporcional [W]
Cocina	1	5,98	0,13	334
Baño	2	5	0,11	279
Pieza principal	3	8,12	0,17	453
Pieza 2	4	8,12	0,17	453
Living - comedor	5-6	20,4	0,43	1140

Los radiadores escogidos según potencia por habitación corresponden a la línea STRADA

Hybrid de JAGA [38] Estos equipos permiten conseguir un ambiente confortable a baja temperatura de agua, permitiendo calefaccionar con temperaturas de 35°C con un salto térmico de 5 °C y a temperaturas más altas como 55 °C con un salto térmico de 10 °C.

Además, estos radiadores permiten refrigeración pasiva o free cooling y cuentan con función breeze para refrigeración: también se puede activar si no hay agua fría, por ejemplo sin una bomba de calor. Sólo con el movimiento de aire de los ventiladores se puede sentir menos calor estando cerca del radiador.

Para poder escoger una bomba circuladora se realizan los mismos pasos que para el sistema de suelo radiante, calculando el caudal necesario por cada circuito así como las pérdidas de carga totales. Para determinar las pérdidas de carga al pasar por los radiadores se utilizan curvas del fabricante según caudal de cada circuito, resultando en 15 [mm.c.a] en el radiador con mayor pérdida.

Tabla 4.19: Resultados de radiadores

Circuito		1	2	3	4	5	6
Largo circuito [m]		7,4	9	10,8	10,6	9,6	10,8
35 °C	Caudal agua [l/min]	0,93	0,76	1,35	1,35	1,55	1,55
	Pérdida carga [m.c.a]	0,01	0,01	0,016	0,016	0,026	0,027
55°C	Caudal agua [l/min]	1,86	1,86	1,86	1,86	1,55	1,55
	Pérdida carga [m.c.a]	0,019	0,021	0,024	0,022	0,022	0,023

El volumen total de la instalación corresponde a la suma de los volumen dentro de los 6 circuitos de tuberías y el volumen dentro de los radiadores. Se considera además la presión máxima y mínima de trabajo igual a la del suelo radiante por lo que el vaso de expansión necesario es:

Tabla 4.20: Resultados de radiadores

Temperatura operación [°C]	35	55
Volumen fluido tuberías [l]	15,7	
Cp	0,857	
Ce	0,0048	0,0127
Volumen vaso expansión [l]	0,07	0,17

4.2. Red de distribución

Para calcular la demanda térmica del conjunto habitacional se multiplica la demanda máxima promedio individual equivalente a 2526 [W] por el número de viviendas y el factor de simultaneidad. Dado que un sistema de baja escala como lo es un condominio de entre 5 a 50 viviendas se tiene menor diversidad que un sistema de alta escala (como una ciudad o comuna por ejemplo), entonces se considera el límite superior del factor de simultaneidad igual a $FS=0,79$.

Una vez que se tiene la demanda térmica de cada conjunto habitacional el primer paso para diseñar la red de distribución es determinar los largos de las cañerías, dado que los conjuntos habitacionales no existen, se propone una distribución estándar de las viviendas en pasajes para poder estimarlos. A continuación se muestra la distribución para el caso de 40 viviendas:

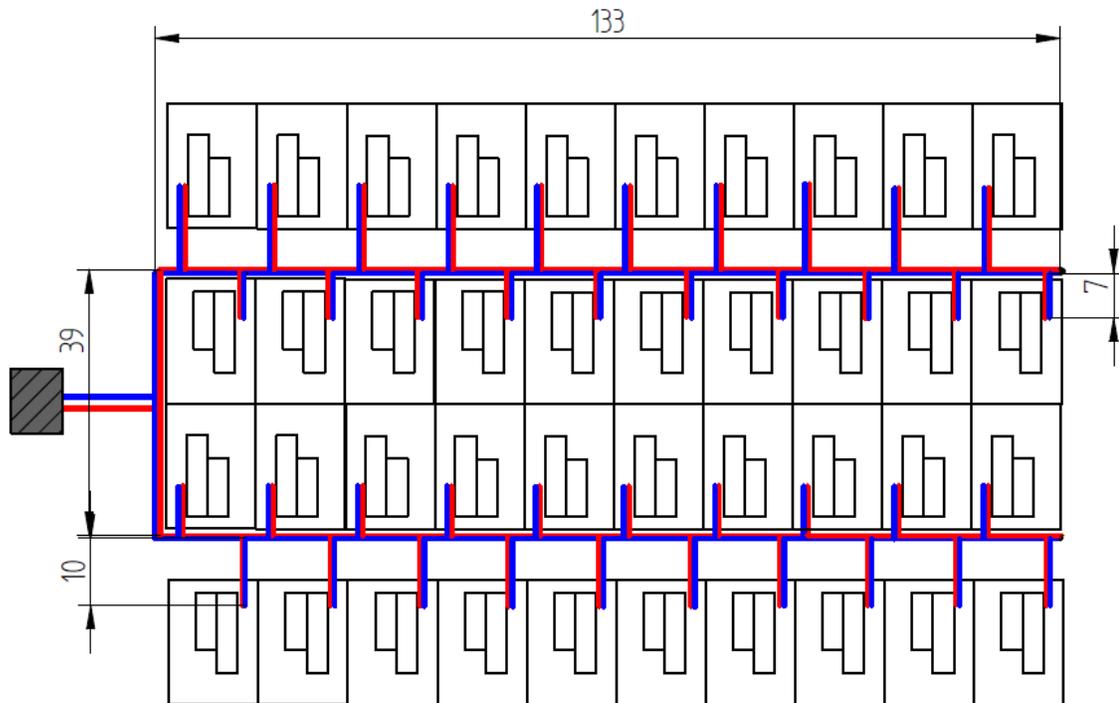


Figura 4.13: Esquema conjunto habitacional

La distribución propuesta corresponde a una tipo árbol en donde se tiene líneas principales con un diámetro mayor constante y líneas secundarias que se conectan a las viviendas con un diámetro menor, en ambos casos se disponen 2 tuberías (ida y retorno). La unión entre líneas principales y secundarias es mediante Tes.

Corresponde a un circuito cerrado donde el fluido es agua con calidad de caldera, esta misma agua es la que va a los circuitos de las viviendas. Las temperaturas son las que se mencionaron antes, con 2 casos de operación (35/30 y 55/45 °C).

Las líneas principales de ida y retorno se conectan al final del trayecto con curvas en 180° que permiten el retorno del fluido en caso de que no se utilice la totalidad del agua caliente y ésta deba ser retornada.

Entonces, los largos requeridos y demanda energética para cada caso son:

Tabla 4.21: Largos de la red de distribución

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Demanda térmica [kW]	10,1	20,2	30,3	40,4	60,6	80,8	101,1
Largo total línea principal [m]	68	146	202	352	439	610	810
Largo total líneas secundarias [m]	92	170	272	340	510	720	816
N° cuadras	1	1	1	2	2	2	3

Se escogen tuberías subterráneas preaisladas de la marca UPONOR y línea Ecoflex Thermo, certificadas según EN 15632 para aplicaciones de canalización de agua de calefacción y refrigeración. Las tuberías preaisladas son altamente flexibles y se suministran en rollos de diferentes longitudes [57].

Están compuestas por:

- **Tubería base:** Polietileno reticulado PEX-A con barrera antidifusión de oxígeno.
- **Aislamiento:** espuma de celda cerrada de PEX, flexible y resistente al envejecimiento.
- **Carcasa exterior:** polietileno de alta densidad (PEAD).

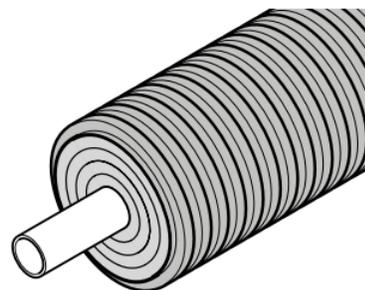


Figura 4.14: Tubería UPONOR Ecoflex preaisladas para distribución [57]

Para determinar los diámetros de cada tubería se itera para optimizar los valores de las 3 condiciones que se debe cumplir en red de distribución:

- Pérdidas térmicas $< 10\%$
- Pérdidas de carga < 100 [Pa/m]
- Velocidad del fluido < 2 [m/s]

Entonces, para calcular las pérdidas térmicas se determina la temperatura del suelo a distintas profundidades. Para esto se requieren datos del suelo, que a modo de aproximación, se utilizan los de la ciudad de Coyhaique en la región de Aysén:

Tabla 4.22: Propiedades del suelo [5]

Conductividad térmica [W/ mK]	0,52
Coefficiente difusividad térmico [$m^2/día$]	0,0174
Capacidad térmica [MJ/m^3K]	2,58

Con estos datos y la ecuación 3.44 se obtiene la curva de temperaturas a lo largo del año a distintas profundidades, considerando que la temperatura media anual de Cochrane es de $8,3$ $^{\circ}C$ y la amplitud máxima $T_{Pmáx}$ es de $5,55$ $^{\circ}C$:

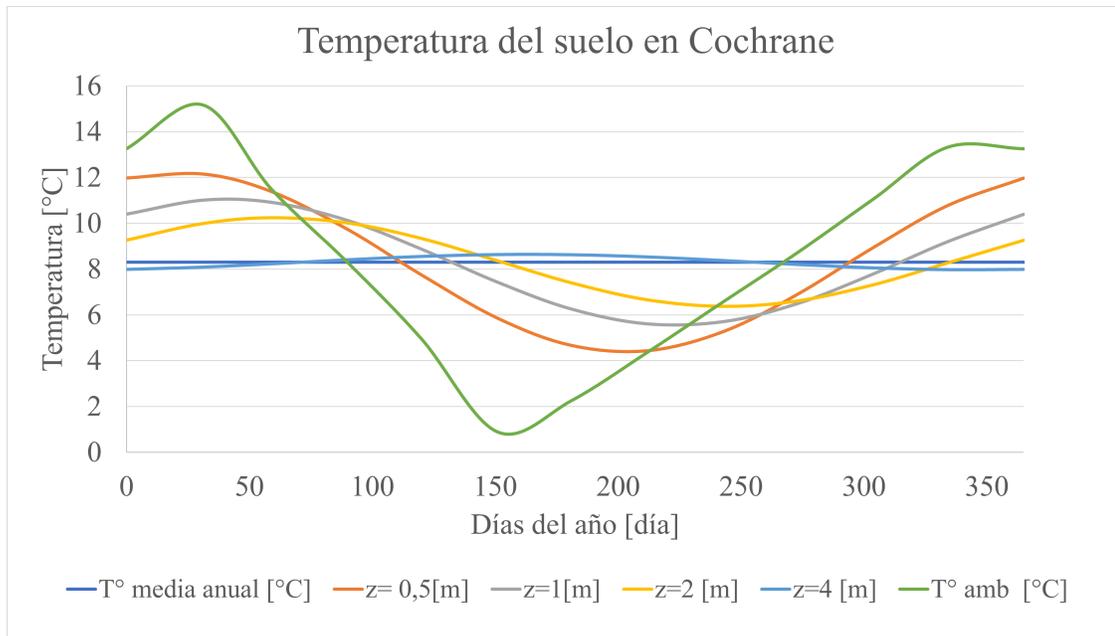
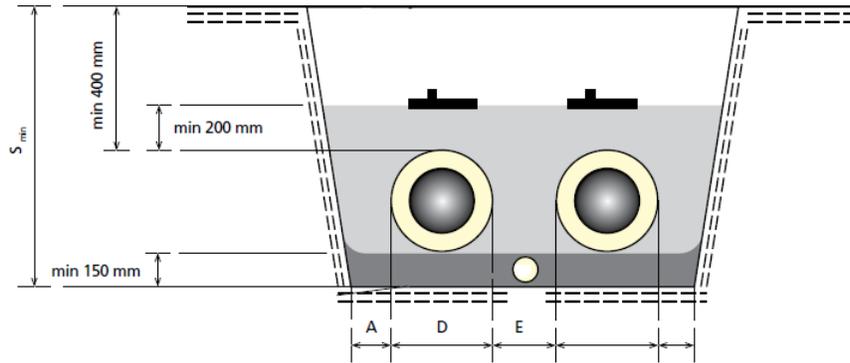


Figura 4.15: Temperatura del suelo a distintas profundidades en Cochrane.

Para determinar la profundidad y separación entre las tuberías de ida y retorno, se consideró los valores recomendados por fabricante.



Diámetro externo D (mm)	A _{min} (mm)	S _{min} (mm)	E _{min} (mm)
90	200	640	200
110	200	660	200
125	200	675	200
140	200	690	200
160	200	710	200
180	200	730	200
200	250	750	250
225	250	775	250
250	250	800	250
280	250	830	250
315	250	865	250
355	250	905	250
400	250	950	250
450	250	1000	250
500	250	1050	250
560	300	1110	300
630	300	1180	300

Figura 4.16: Disposición de las tuberías de distribución en las trincheras

Además, a la profundidad establecida por fabricante se le debe incorporar el espesor de la capa ficticia para el cálculo de la resistencia térmica. El coeficiente convectivo se calcula con la velocidad promedio del viento a lo largo del año y ecuación 3.13, resultando en $14 [W/m^2K]$ por lo que:

$$\delta = \frac{k_s}{h_c} = \frac{0,52[W/mK]}{14[W/m^2K]} = 0,037[m] \quad (4.1)$$

Se considera que la línea de abastecimiento será la línea 1 y la de retorno la línea 2, por lo que los factores de temperatura para el caso de agua a $35^\circ C$ y a $55^\circ C$ son:

Tabla 4.23: Factores de temperatura en red de distribución

	Caso $35^\circ C$	Caso $55^\circ C$
Temperatura ida (1) [$^\circ C$]	35	55
Temperatura retorno (2) [$^\circ C$]	30	45
θ_1	0,83	0,80
θ_2	1,20	1,25

Los factores geométricos varían en cada caso según sea el diámetro y separación entre tuberías.

Para el cálculo de las pérdidas térmicas se considera la temperatura del suelo mínima a lo largo del año a la profundidad escogida, es decir, la condición más desfavorable. La profundidad promedio bordea los 0,8 [m] y la temperatura mínima a lo largo del año a esta profundidad es de 5,13 [°C].

Una vez que se calcula la resistencia térmica efectiva para cada tubería se puede obtener el flujo térmico lineal q [W/m] y teniendo el largo de cada cañería se obtiene el calor total perdido por sistema, tanto en líneas principales como secundarias. Luego, teniendo las pérdidas, éstas se deben sumar a la demanda térmica demandada por el conjunto habitacional para encontrar el calor total que se debe generar. El detalle para cada caso se puede encontrar en el Anexo A.1.

Para escoger las bombas circuladoras del sistema se requiere del caudal y pérdidas de carga. Tal como se dijo antes, la distribución será de forma convencional en forma de pasajes, en donde cada cuadra cuenta con un conjunto de bombeo y con esto se asegura la autonomía de los sectores, al mismo tiempo que se obtiene redundancia en los sistemas de operación, aumentando la confiabilidad del sistema. El esquema general del sistema de distribución se muestra a continuación:

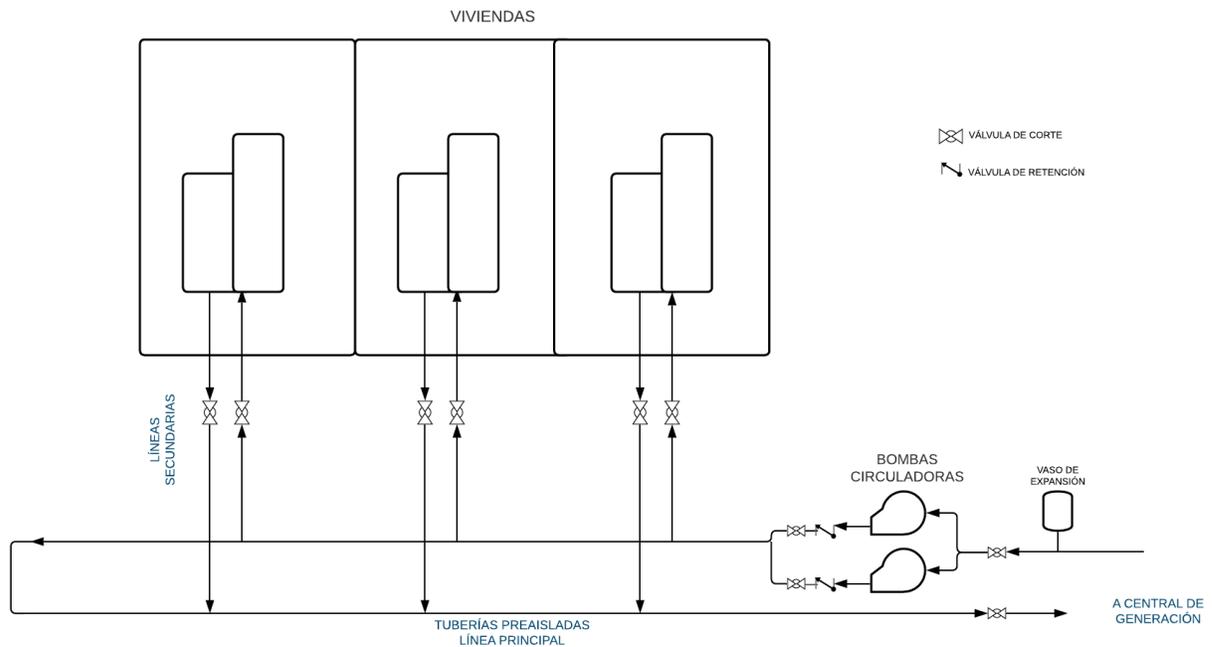


Figura 4.17: Esquema de componentes principales de red de distribución propuesta

Luego, para calcular las pérdidas de carga regulares se determinan los caudales en cada circuito, reynolds y factor de fricción dependiendo de si el flujo es turbulento o laminar y con esto las pérdidas de carga regulares considerando que las tuberías tienen una rugosidad de 0,000007.

Para las pérdidas secundarias se identifican los accesorios principales de la red. Por cada línea debe existir al menos: 2 codos en 90°, 1 codo en 180° para el retorno, 1 válvula de retención por bomba, válvulas de corte en cada nodo y por cada vivienda existe al menos: 2 conexiones T y 2 válvulas de corte.

En este caso cada cuadra corresponde a un circuito en paralelo, a su vez las viviendas operan en paralelo. Por lo que las pérdidas de carga serán las del circuito más desfavorable resultando en:

Tabla 4.24: Red de distribución - 35°C

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Número circuitos	1	1	1	2	2	2	3
Diámetro interno tubería [mm]	32	51	51	51	51	61,4	51
Velocidad (m/s)	0,64	0,51	0,77	0,52	0,77	0,71	0,86
Reynolds	28420	36055	54019	36354	54336	60196	60678
Pérdida carga regular [m.c.a]	0,63	0,49	1,51	0,60	1,66	1,57	2,70
Pérdidas por accesorios [m.c.a]	0,56	0,59	1,88	0,60	1,90	2,07	2,59
Pérdida total [m.c.a]	1,3	1,2	3,5	1,3	3,7	3,7	5,4
Caudal [l/min]	30,9	62,4	93,5	62,9	94	125,4	105

Tabla 4.25: Red de distribución - 55°C

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Número circuitos	1	1	1	2	2	2	3
Diámetro interno tubería [mm]	32	32	40,8	32	40,8	51	40,8
Velocidad (m/s)	0,34	0,67	0,62	0,67	0,62	0,54	0,70
Reynolds	20364	40702	48181	41090	48589	52304	54317
Pérdida regular [m.c.a]	0,17	1,47	1,3	1,8	1,442	1,14	2,35
Pérdida secundaria [m.c.a]	0,15	1,02	1,24	1,04	1,26	1,2	1,75
Pérdida total [m.c.a]	0,35	2,51	2,57	2,87	3,1	2,622	4,13
Caudal [l/min]	16,00	31,98	48,26	32,28	48,67	65,49	54,41

Una vez que se tiene el caudal, la pérdida de carga total de cada cuadra y diametro nominal para la conexión, se escogen bombas circuladoras, en donde se considera la instalación de N+1 bombas en paralelo para mejorar la confiabilidad del sistema, tal como se observó en la Figura 4.17. Entonces, opera una bomba y otra se encuentra en stand by aumentando así el porcentaje de disponibilidad del sistema.

La marca de bomba circuladora escogida corresponde a Grundfos línea MAGNA3, con regulación electrónica.

Con respecto al vaso de expansión, es aconsejable situarlo en la aspiración de la bomba, tal como se observa en el esquema, ya que esta será la zona con menor presión de todo el sistema y el punto de conexión del vaso se constituye como punto de presión nula o presión de referencia del circuito. Dado que el circuito de la red de distribución se conecta a las

viviendas, se mantienen las presiones máximas y mínimas en 9 y 1,5 [bar] y las temperaturas por lo que los coeficientes son los mismos.

Tabla 4.26: Vaso de expansión para red de distribución

Viviendas		5	10	15	20	30	40	50
Volumen agua en la red [l]		85	354	502	830	1063	2041	2029
35 °C	Volumen estanque [l]	500	500	750	750	2000	2000	2000
	Volumen total [l]	585	854	1252	1580	3063	4041	4029
	Volumen vaso expansión [l]	24	35	51	65	126	166	166
55°C	Volumen estanque [l]	200	200	750	750	1000	2000	1000
	Volumen total [l]	285	373	1103	1144	1741	3481	2398
	Volumen vaso expansión [l]	11,7	15,3	45,4	47,1	71,6	143,2	98,6

4.3. Sistema de generación con energía geotérmica

El primer paso para el diseño de la planta de generación corresponde a la elección de bombas de calor geotérmicas que permitan abastecer la demanda térmica del conjunto habitacional considerando las pérdidas en distribución y el factor de simultaneidad. Se escogen las bombas de la marca Ecoforest.

Estas bombas de calor, tanto a nivel doméstico como de alta potencia, son compatibles con cualquiera de los tipos de captación geotérmica. Así mismo, también son capaces de ofrecer los servicios requeridos en un sistema de climatización de forma integrada: ACS, calefacción, piscina, refrigeración pasiva (o free cooling) y refrigeración activa [26].

Todas las bombas hacen uso de la tecnología inverter, que les permite modular su potencia, adaptándose así en todo momento a las demandas de la instalación con la mayor eficiencia. Esto se traduce en una reducción muy considerable del consumo y en un gran ahorro, dada la alta eficiencia de estos equipos.

La gama doméstica tiene rangos de potencia: 1-6 kW / 1-9 kW / 3-12 kW / 5-22 kW , con posibilidad de conectar hasta 3 en cascada. Mientras que la gama de alta potencia está disponible en rangos de 12-40 kW / 15-70 kW / 25-100 kW con la posibilidad de conectar hasta 6 bombas de calor en paralelo. El uso de BCG en cascada busca repartir el número de horas de trabajo y el punto de máxima eficiencia. Esto último significa que para dar cierta potencia, funcionen varias bombas en su punto de mayor COP, en lugar de una única bomba de calor.

En base a lo anterior, se escogen bombas de calor considerando la variabilidad de la demanda a lo largo del año, por lo que aunque se pueda satisfacer la demanda con 1 bomba de alta potencia se priorizará tener más de una de menor potencia para mejorar el COP, mejorar la confiabilidad y además el sistema podrá funcionar con potencias mínimas más bajas.

Dado que se trabaja con 2 casos de temperatura de producción a 55 y 35 °C se determina el COP asociado para cada caso haciendo uso de las curvas de rendimiento para distintas velocidades del compresor y se fija la temperatura de captación deseada en 5°C con un salto térmico de $\Delta T = 3$ [°C]. A continuación se muestra una de las curvas para la BCG de potencia de 5-22 [kW] donde la operación a 55°C de diseño se determina con la curva verde (B5/W55):

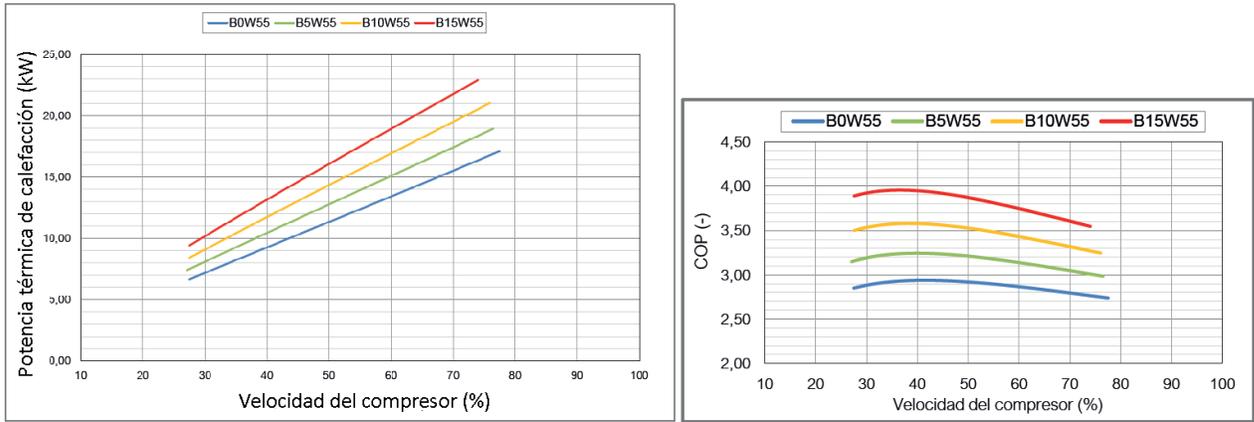


Figura 4.18: Curva de operación de BCG Ecoforest 5-22 kW

Se debe destacar que las curvas están diseñadas para una producción con un salto térmico de 5°C, es decir de 55 a 50 °C, sin embargo, dado que los radiadores de las viviendas requieren un salto de 10 °C, se consulta con el departamento comercial de Ecoforest y comentan que "tienen como predeterminado trabajar con un $\Delta T = 5 [^{\circ}\text{C}]$, pero este parámetro es modificable y permite trabajar con un ΔT de 10. El COP se podría ver afectado pero muy levemente, apenas disminuiría."

Con lo que los datos de cada caso se resumen como:

Tabla 4.27: Bombas de calor escogidas

		Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
55°C	Potencia necesaria [kW]		11,2	22,5	33,7	45,4	67,9	91,3	113,8
	Modelo BCG		1-9	3-12	5-22	5-22	12-40	15-70	15-70
	N° requerido		2	2	2	3	2	2	2
	COP		2,95	2,95	2,95	3,04	2,85	2,85	2,8
	Potencia máxima [kW]		12,3	29	38	57	92	120	124
	Potencia mínima [kW]		0,3	2	7,5	7,5	12	15	15
35°C	Potencia necesaria [kW]		10,7	21,7	32,6	43,8	65,5	87,3	109,7
	Modelo BCG		1-9	3-12	5-22	5-22	12-40	12-40	15-70
	N° requerido		2	2	2	2	2	2	2
	COP		4,8	4,8	4,9	4,85	5	4,8	4,9
	Potencia máxima		13	32	48	48	104	104	140
	Potencia mínima		0,3	2,2	4,5	4,5	12	12	15

Considerando las potencias mínimas de trabajo, se puede determinar el volumen de estanque de inercia requerido para los momentos en que la potencia demandada es menor a la potencia mínima que genera el equipo debido al compresor (Ecuación 3.58). Se utilizan estanques de la marca Ecoforest y se selecciona el tamaño inmediatamente superior de catálogo:

Tabla 4.28: Estanques de inercia requeridos

Viviendas		5	10	15	20	30	40	50
55°C	Volumen mínimo [l]	20	161	628	623	998	1245	1233
	Capacidad estanque [l]	200	200	750	750	1000	2000	2000
35°C	Volumen mínimo [l]	40	356	740	728	1997	1973	2467
	Capacidad estanque [l]	200	500	750	750	2000	2000	2x2000

Luego, una vez que se ha escogido la bomba de calor para cada número de viviendas y temperaturas de impulsión a 35 y 55°C se deben calcular los caudales para cada sistema de captación.

Para esto se considera que los sistemas de captación cerrados utilizan agua con un 20 % de etilenglicol y el salto térmico es de $\Delta T_{suelo} = 3^\circ C$. Las propiedades se determinan con las tablas del anexo C y se evalúan a la temperatura de 5°C.

Se opta por etilenglicol por sobre propilenglicol debido a que con el primero se obtienen mayores valores de número de Reynolds (que implica mayor turbulencia del fluido) y menores pérdidas de carga que la mezcla de agua con propilenglicol.

Tabla 4.29: Propiedades del agua con 20 % de etilenglicol

Agua con 20 % Etilenglicol		
Calor específico	kJ/ kg K	3,9355
Viscosidad	$Pa \cdot s \cdot 10^{-3}$	3,1
Densidad	g/cm^3	1,029
Viscosidad cinemática	m^2/s	3,0E-06
Conductividad térmica	W/ m K	0,53
Temperatura de fusión	°C	-10

Para los sistemas de captación abierto el fluido es agua y se calcula para obtener un salto térmico de 4°C.

4.3.1. Sistemas de captación

4.3.1.1. Horizontal cerrado

El primer paso para comenzar con el diseño de la red horizontal cerrada es escoger tuberías, en este caso se escogen tuberías de PE100 con un diámetro interno de 19 [mm] y exterior de 24 [mm] cuya conductividad térmica es de 0,48 [W/mK] [33], resultando en una resistencia térmica de tubería de 0,071 [mK/W].

Luego se evalúa la resistencia térmica del suelo, para esto se necesitan las horas de uso anual (Tabla 4.8), la difusividad térmica del suelo y el radio externo de la sonda. Se fija una separación de 0,5 [m] en el caso horizontal simple y de 4,5 [m] en el horizontal slinky, la profundidad en ambos casos es de 1,5 [m].

El loop slinky se considera con dimensiones estándar de 36 [in] de diámetro y un paso de 18 [in].

Con esto se puede determinar la resistencia del suelo para 1 sonda, sin embargo, dado que en un campo de captación geotérmico se disponen varias sondas en paralelo, la resistencia térmica del suelo aumenta debido a la interferencia que ocasiona una sonda con respecto a la otra. Para incorporar este efecto se utiliza el método descrito de los tubos imagen con lo cual resulta:

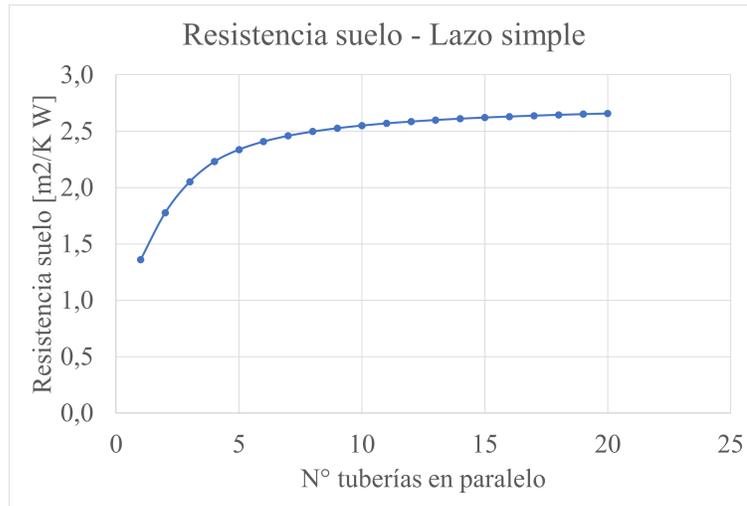


Figura 4.19: Resistencia térmica del suelo en campo geotérmico horizontal

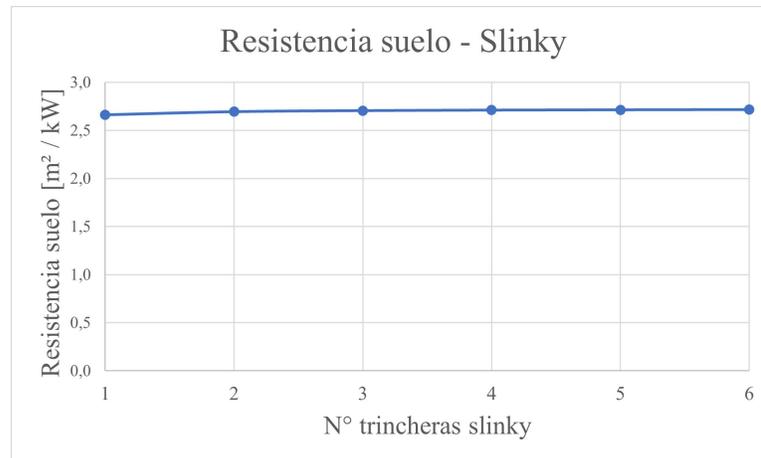


Figura 4.20: Resistencia térmica del suelo en campo geotérmico slinky

En los gráficos se pudo observar que para el sistema de lazo simple, mientras más tubos se dispongan en paralelo mayor es la resistencia térmica del suelo. Y tras un número elevado de tuberías en paralelo, la resistencia se vuelve más constante. Para el caso Slinky la resistencia térmica es constante debido principalmente a que la separación entre trincheras es mucho mayor.

Entonces, una vez que se tiene la resistencia del suelo para distintos números de tubos se

calcula el largo requerido considerando que la temperatura del suelo mínima a lo largo del año a una profundidad de 1,5 [m] es de 6,4 [°C] (Ecuación 3.44).

Teniendo el largo total requerido para el intercambio térmico se evalúa el número y largo de cada trinchera así como también el número de zanjas que operan en paralelo con el objetivo de mantener un flujo turbulento. El largo de cada circuito en paralelo se escoge de tal forma que todos los circuitos tengan la misma longitud para no tener problemas con los balances hidráulicos.

Luego se calcula el caudal que circula por cada circuito y con esto la resistencia térmica advectiva del fluido caloportador para incluirlo en la ecuación del cálculo del largo del intercambiador de calor. Este se trata de un proceso iterativo.

A su vez, teniendo el caudal por cada circuito se calculan las pérdidas de carga regulares y secundarias, siendo la pérdida de carga total la máxima de los circuitos al trabajar estos en paralelo. Para las pérdidas regulares se tiene que la rugosidad del PE100 es de 0,000007. Dentro de las pérdidas secundarias están los accesorios y las pérdidas por el paso por las bombas de calor, para esto se utilizan las curvas entregadas por el fabricante (Anexo B), considerando el caudal y que el fluido pasa por el evaporador

Tabla 4.30: Resultados para intercambiador Horizontal

Horizontal					
Viviendas		5	10	15	20
55°C	Caudal total [l/s]	0,6	1,2	1,8	2,5
	Reynolds	2641	2640	2490	2708
	Pérdidas de carga [m.c.a]	4,1	4,3	4,2	4,0
35°C	Caudal total [l/s]	0,7	1,4	2,1	2,9
	Reynolds	2542	2372	2322	2309
	Pérdidas de carga [m.c.a]	4,4	4,0	3,8	3,7

Tabla 4.31: Resultados para intercambiador Slinky

Slinky					
Viviendas		5	10	15	20
55°C	Caudal total [l/s]	0,6	1,2	1,8	2,5
	Reynolds	3302	3299	3320	3008
	Pérdidas de carga [m.c.a]	6,0	6,2	6,4	4,8
35°C	Caudal total [l/s]	0,7	1,4	2,1	2,9
	Reynolds	3050	3084	3318	3118
	Pérdidas de carga [m.c.a]	5,7	5,7	6,3	5,6

Se diseña para obtener la mayor cantidad de circuitos en paralelo y así disminuir las pérdidas de carga pero mantener un flujo turbulento.

Con estos valores se escogen bombas circuladoras de caudal variable de la marca Groundfos línea MAGNA1. Para aumentar la confiabilidad del sistema se considera nuevamente la

instalación de 1 bomba extra en stand by por grupo de impulsión. A continuación se muestra el esquema general de diseño para el grupo de generación con circuitos cerrados:

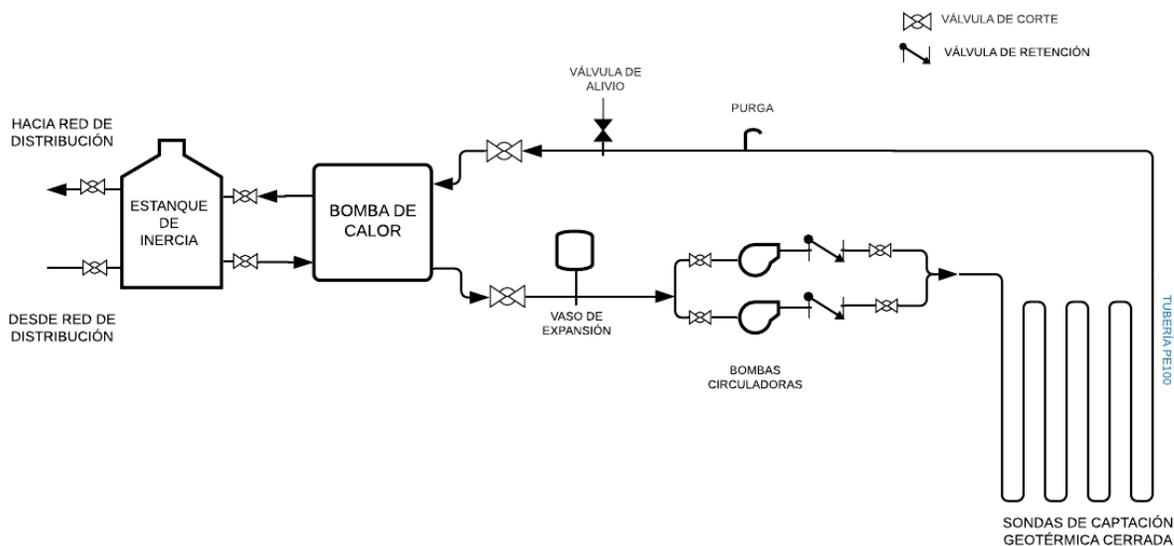


Figura 4.21: Esquema del grupo de generación geotérmica cerrado

Tal como se ve en el esquema de la figura 4.21, el vaso de expansión se ubica en la aspiración de la bomba y se calcula considerando que la presión máxima y mínima es de 6 y 4 [bar] [4], resultando en un coeficiente $C_p = 0,6$. Para los coeficientes de expansión térmica se calcula según ecuación 3.40 y se considera además que al tener un fluido con 20% de etilenglicol el resultado se corrige multiplicando por un factor $F_{C_{35^\circ}} = 1,54$ y $F_{C_{55^\circ}} = 1,38$ lo que resulta en: $C_{e_{55^\circ}} = 0,0175$ y $C_{e_{35^\circ}} = 0,0074$.

Tabla 4.32: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación horizontal

Horizontal					
Viviendas		5	10	15	20
55 °C	Volumen fluido [l]	434	872	1339	1779
	Volumen vaso expansión [l]	4,6	9,2	14,1	18,7
35 °C	Volumen fluido [l]	467	944	1422	1909
	Volumen vaso expansión [l]	2,1	4,2	6,3	8,5

Tabla 4.33: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación slinky

Slinky					
Viviendas		5	10	15	20
55°C	Volumen fluido [l]	426	862	1294	1791
	Volumen vaso expansión [l]	4,5	9,1	13,6	18,8
35°C	Volumen fluido [l]	476	968	1459	1960
	Volumen vaso expansión [l]	2,1	4,3	6,5	8,7

4.3.1.2. Vertical cerrado

El esquema general de una instalación vertical cerrada es equivalente al de la figura 4.21 con la diferencia que el sistema de tuberías se encuentra rodeado de mortero en su espacio anular. Se escoge mortero Morcem GeogROUT que es especial para el bombeo, inyección y relleno de perforaciones de sondeos geotérmicos debido a su alta conductividad térmica [35].

Para el sistema U se considera que el diámetro de la perforación es de 0,12 [m] y para el sistema 2U será de 0,15 [m], en ambos casos se utilizan tuberías de PE100. Se debe calcular además el factor de corrección debido a la geometría U o 2U:

Tabla 4.34: Resistencia térmica de perforación vertical cerrada

	Unidad	Vertical U	Vertical 2U
Diámetro interno tubería PE100	m	0,033	0,0262
Diámetro externo tubería PE100	m	0,040	0,032
Resistencia térmica tubería (R_p)	m^2/KW	0,038	0,037
Distancia entre tuberías	m	0,06	0,06
Distancia diagonal	m	-	0,0848
Diámetro perforación	m	0,12	0,15
Conductividad térmica relleno (k_g)	W / mK	2,1	
Resistencia térmica del mortero (R_g)	m^2/KW	0,069	0,120
Factor correctivo (x)	-	0,673	0,691
Resistencia térmica corregida lechada (R_{con_g})	m^2/KW	0,046	0,083

Al calcular la resistencia del suelo frente a un campo de perforaciones U o 2U se espera que ésta aumente mientras más intercambiadores hay. A continuación se muestra cómo afecta la resistencia del suelo al incluir más intercambiadores ubicándolos en 1 fila, 2 filas y 3 filas para distintos valores de separación:

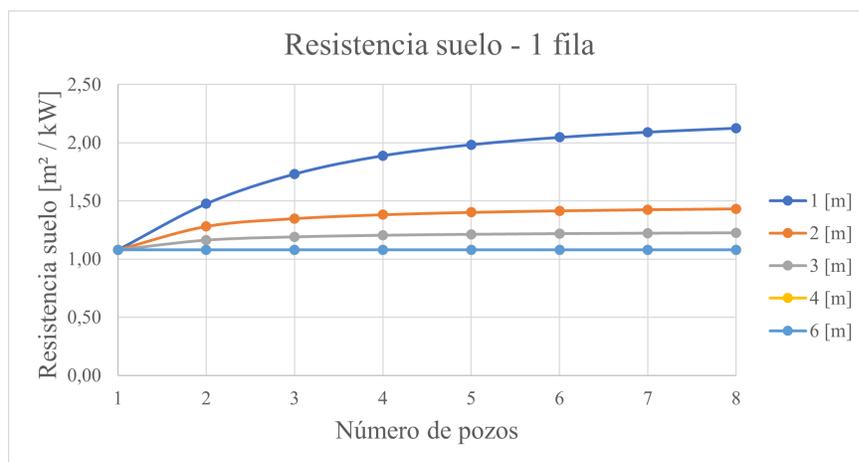


Figura 4.22: Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 1 fila

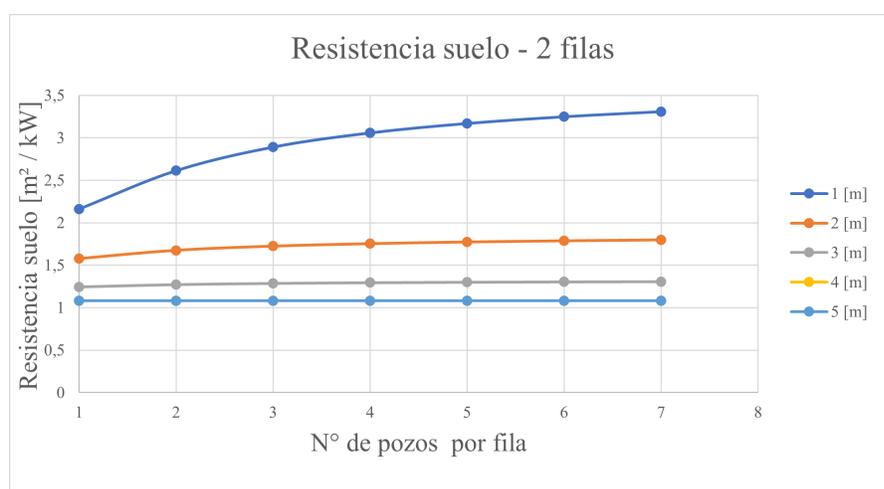


Figura 4.23: Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 2 filas

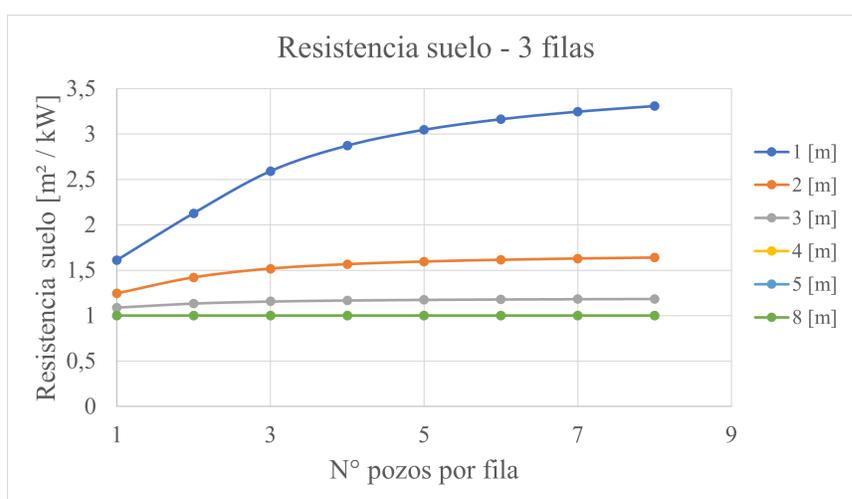


Figura 4.24: Resistencia térmica en campo geotérmico vertical U - 3 filas

Dado que en todos los casos tras los 4 a 5 [m] de separación entre pozos deja de existir

interferencia, se escoge una separación de 6 [m] entre pozos, lo cual concuerda con los valores recomendados. Además, con las curvas anteriores se pudo observar que la resistencia térmica aumenta al aumentar el número de filas por lo que se debe priorizar un arreglo de 1 fila con perforaciones en línea.

Con respecto a la profundidad de cada sistema, se proponen 2 casos de estudio debido a la incertidumbre en aspectos técnico-geológicos y además económicos, pues según el servicio de perforaciones cotizado (Anexo D.9.2), para perforaciones de hasta 80 [m] el valor es de \$135.000 por metro pero para perforaciones de hasta 130 [m] el valor es de \$155.000.

Entonces se propone que la profundidad será de hasta 80 [m] o bordeará los 120 [m], ajustándose éste valor según sea el largo final requerido del intercambiador para obtener un número natural de intercambiadores con la misma profundidad. Para esto también se debe ir ajustando la temperatura del suelo según:

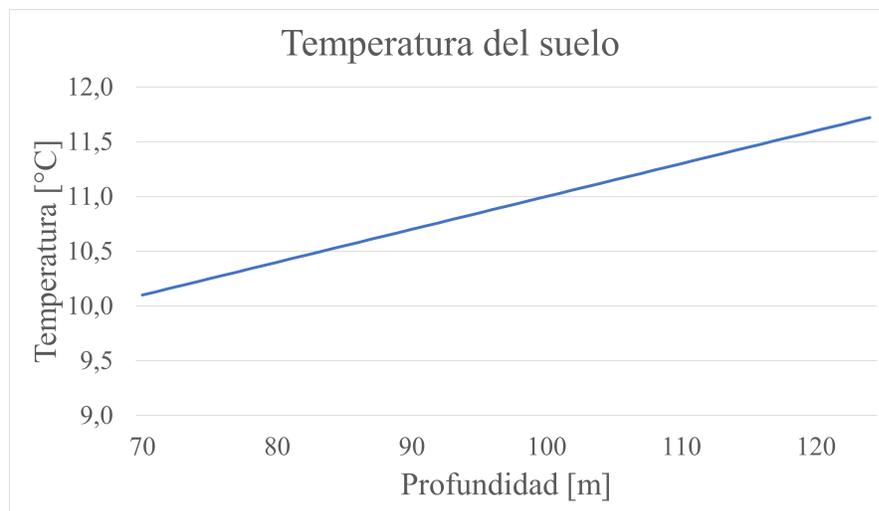


Figura 4.25: Temperatura del suelo a profundidades

Luego se debe calcular el caudal total y las pérdidas de carga. Se determina que todos los pozos operarán en paralelo, siendo las pérdidas de carga totales igual a la suma de las pérdidas regulares y secundarias en cada circuito al ser estos iguales. Al igual que para los sistemas horizontales, se debe considerar la pérdida de carga por el paso por la bomba de calor.

Entonces, con los valores obtenidos que se muestran en la siguiente tabla se escoge bomba circuladora de caudal variable de la marca Grundfos línea MAGNA3.

Tabla 4.35: Resultados para intercambiador Vertical U - 80 [m]

Vertical U - 80 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Profundidad [m]	76	75	75	78
	Caudal total [l/s]	2,5	3,6	4,9	6,0
	Reynolds	3223	3133	3162	3254
	Pérdidas de carga [m.c.a]	2,0	2,4	1,8	2,8
35°C	Profundidad [m]	78	78	78	78
	Caudal total [l/s]	2,6	4,0	5,3	6,6
	Reynolds	2853	2876	3104	2960
	Pérdidas de carga [m.c.a]	2,6	2,6	1,9	2,9

Tabla 4.36: Resultados para intercambiador Vertical U - 120 [m]

Vertical U - 120 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Profundidad [m]	111	120	118	115
	Caudal total [l/s]	2,5	3,6	4,9	6,0
	Reynolds	5371	5875	5749	5577
	Pérdidas de carga [m.c.a]	3,0	3,6	3,0	3,8
35°C	Profundidad [m]	110	115	117	120
	Caudal total [l/s]	2,6	4,0	5,3	6,6
	Reynolds	5301	5589	5675	6210
	Pérdidas de carga [m.c.a]	3,5	3,7	3,1	4,4

Y para los intercambiadores cerrados dobles se obtiene:

Tabla 4.37: Resultados para intercambiador Vertical 2U - 80 [m]

Vertical 2U - 80 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Profundidad [m]	76	78	75	77
	Caudal total [l/s]	2,5	3,6	4,9	6,0
	Reynolds	4010	4177	3934	4048
	Pérdidas de carga [m.c.a]	2,7	3,21	2,44	3,43
35°C	Profundidad [m]	74	74	78	78
	Caudal total [l/s]	2,6	4,0	5,3	6,6
	Reynolds	3847	3864	4172	4139
	Pérdidas de carga [m.c.a]	3,21	3,22	2,7	3,7

Tabla 4.38: Resultados para intercambiador Vertical 2U - 120 [m]

Vertical 2U - 120 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Profundidad [m]	114	120	112	119
	Caudal total [l/s]	2,5	3,6	4,9	6,0
	Reynolds	6683	7310	6557	6940
	Pérdidas de carga [m.c.a]	5,7	6,96	5,3	6,85
35°C	Profundidad [m]	121	118	121	120
	Caudal total [l/s]	2,6	4,0	5,3	6,6
	Reynolds	7695	6954	7649	7244
	Pérdidas de carga [m.c.a]	7,95	6,77	7,14	7,43

El número de Reynolds en todos los casos indica que se trata de un flujo turbulento lo que permite mejorar la transferencia de calor.

Una vez que se ha escogido la bomba, se puede calcular el volumen total de fluido que circula por los sistemas de captación cerrado para determinar el volumen requerido por el vaso de expansión, los coeficientes C_e y C_p son los mismos que para el caso de captación horizontal.

Tabla 4.39: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical U - 80 [m]

Vertical U - 80 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Volumen fluido [l]	1272	1860	2519	3056
	Volumen vaso expansión [l]	13,4	19,5	26,4	32,1
35°C	Volumen fluido [l]	1508	2258	2885	3715
	Volumen vaso expansión [l]	6,7	10,0	12,8	16,5

Tabla 4.40: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical U - 120 [m]

Vertical U - 120 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Volumen fluido [l]	1108	1509	2168	2680
	Volumen vaso expansión [l]	11,6	15,8	22,8	28,1
35°C	Volumen fluido [l]	1276	1918	2530	2985
	Volumen vaso expansión [l]	5,7	8,5	11,2	13,3

Tabla 4.41: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical 2U - 80 [m]

Vertical 2U - 80 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Volumen fluido [l]	808	1160	1585	1942
	Volumen vaso expansión [l]	8,5	12,2	16,6	20,4
35°C	Volumen fluido [l]	936	1370	1823	2311
	Volumen vaso expansión [l]	4,2	6,1	8,1	10,3

Tabla 4.42: Volumen requerido por vaso de expansión en sistemas de captación vertical 2U - 120 [m]

Vertical 2U - 120 [m]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Volumen fluido [l]	738	1006	1448	1786
	Volumen vaso expansión [l]	7,7	10,6	15,2	18,8
35°C	Volumen fluido [l]	794	1278	1578	1995
	Volumen vaso expansión [l]	3,5	5,7	7,0	8,9

4.3.1.3. Vertical Abierto

Para el sistema de captación vertical abierto se consideran como elementos principales de este estudio los siguientes:

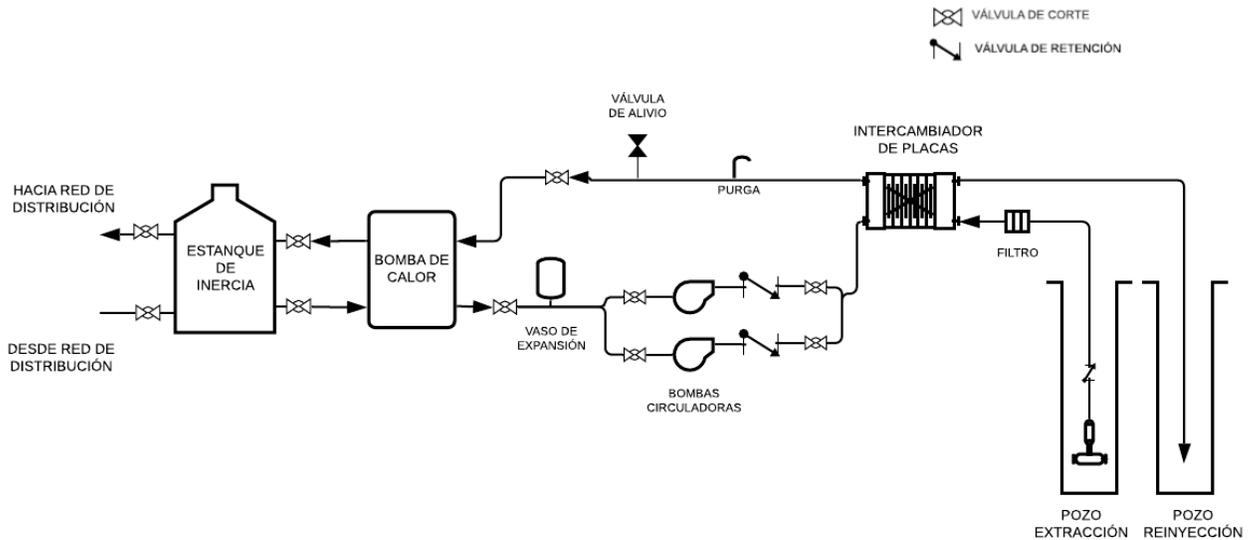


Figura 4.26: Diagrama del sistema de captación abierto

Dado que no se cuenta con estudios de suelo o sondajes ni registros de derechos de agua sobre pozos en la zona, la temperatura del agua, así como el caudal probable y profundidad se limita a lo esperado según caso de colegio de Coyhaique que extrae agua de pozo para captación vertical abierta.

Para el caso del colegio de Coyhaique, se estima necesario que la profundidad del pozo de extracción sea de aproximadamente 35 [m] y 8 pulgadas de diámetro, mientras que para el pozo de reinyección se consideran 24 [m] de profundidad y 6 pulgadas de diámetro. Se realizaron pruebas de bombeo donde se verificó la capacidad del acuífero para abastecer 8 [l/s] en función de la profundidad en la que se encontraba.

Entonces, se calcula el caudal necesario para extraer del pozo. Se considera que el nivel estático en Coyhaique está a 5 [m] aproximadamente y la temperatura del agua subterránea a una profundidad de 35 [m] bordea los 10 °C [40]. Por lo que considerando una descarga de agua en el pozo de reinyección a 6 °C se aprovecharía un salto térmico de 4 °C.

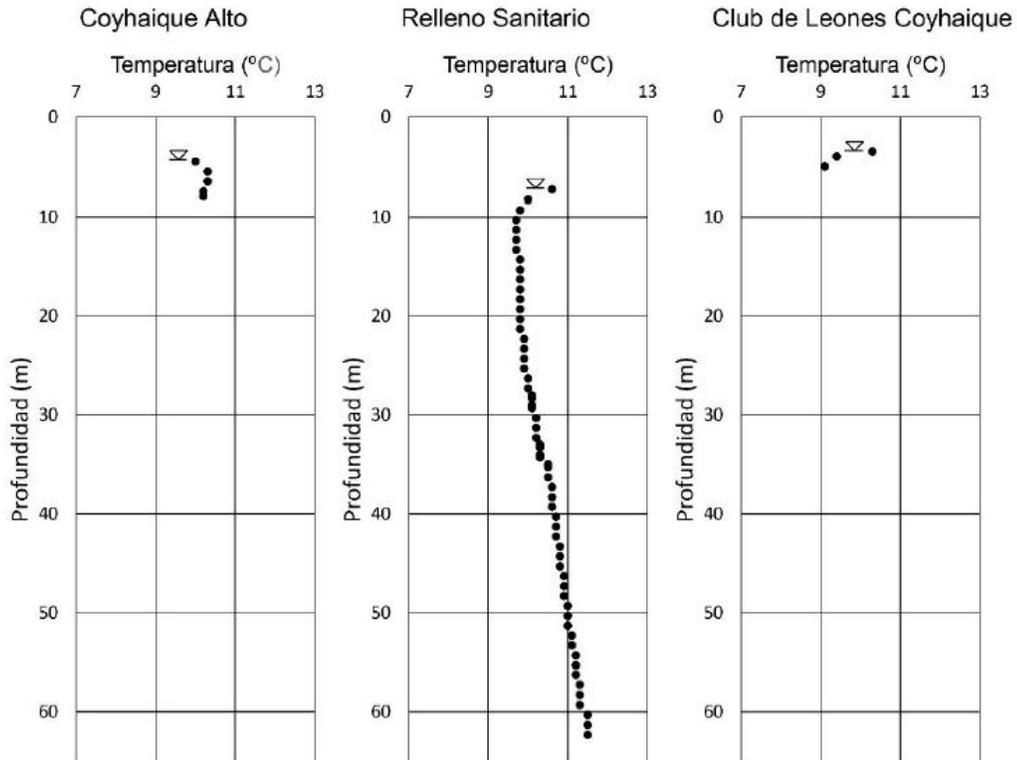


Figura 4.27: Medición de temperatura y nivel estático para captar agua subterránea en la ciudad de Coyhaique [40]

Luego, se escogen intercambiadores de calor según potencia de la marca Ecoforest que están especialmente diseñados para la conexión de aguas freáticas con las bombas de calor de esta misma marca.

No se escogen bombas de elevación para pozo dado que el servicio de construcción y habilitación de los pozos cotizado incluye la bomba. Sin embargo se estudian bombas para tener una aproximación del consumo energético para una elevación de 35 [m] a los distintos caudales.

4.4. Costos proyecto

Todos los costos del proyecto son evaluados en el año 2020. Se considera que el proyecto tiene una vida útil de 30 años. Además se debe hacer una distinción sobre la evaluación económica desde el punto de vista privado o público:

Desde el punto de vista de una inversión privada, se tiene una tasa de descuento nominal del 12 % y una inflación anual estimada del 3 %. Esto da como resultado una tasa de descuento real (tasa nominal - inflación) del 9 % [31]. Mientras que al realizar un análisis desde el punto de vista público se puede considerar:

- Las emisiones nocivas son consideradas, en este análisis las emisiones de MP2,5 reciben un valor monetario (4,49 USD/kg MP2,5).
- Los costos de inversión inicial se estiman sin IVA, ya que los impuestos en general se consideran costos que se transfieren dentro de la sociedad. Estos son por lo tanto depreciados en una inversión pública.
- La tasa de descuento para la evaluación de la viabilidad pública -económica es de 6 % nominal, lo cual resulta en una tasa de descuento real del 3 %.

4.4.1. Costos inversión

Los precios de equipos, materiales y servicios se determinaron de catálogos, cotizaciones y estudios similares. En el Anexo D se encuentran los valores según requerimientos .

Conexión a la vivienda

Como se trata de viviendas nuevas, no se considera es costo por construcción del piso dado que es parte del valor de la vivienda. El valor de instrumentación incluye controlador de temperatura y válvulas de equilibrado [44]. Con lo que la inversión de la vivienda corresponde a:

Tabla 4.43: Costos de inversión en suelo radiante [2] [4][44] [57]

	Valor
Materiales suelo radiante	
Mortero	\$ 126.376
Tubería PEX-A	\$ 681.946
Poliestireno expandido	\$ 783.288
Film polietileno	\$ 217.958
Malla	\$ 871.200
Bomba circuladora (ALPHA3)	\$ 452.160
Instrumentación	\$ 699.720
Colector	\$ 363.440
Vaso expansión	\$ 30.024
Total	\$ 4.226.112

Tabla 4.44: Costos de inversión en radiadores [2] [38][44] [57]

	Caso 35°C	Caso 55°C
Radiadores	\$ 3.519.980	\$ 2.532.700
Bomba circuladora (ALPHA3)	\$ 452.160	\$ 452.160
Instrumentación	\$ 699.720	\$ 699.720
Vaso expansión	\$ 30.024	\$ 30.024
Tuberías multicapa	\$ 94.012	\$ 94.012
Colector	\$ 363.440	\$ 363.440
Aislación tuberías	\$ 47.330	\$ 47.330
Total	\$ 5.179.223	\$ 4.191.943

Distribución

La inversión en la red de distribución incluye tuberías, bombas de circulación, vaso de expansión y accesorios. Además, se considera el costo por el servicio de excavaciones, mano de obra y posterior pavimentación de la línea de distribución equivalente a 115.613 $[\$/m^3]$ según estudio de calefacción distrital en Aysén [31]. El costo debido a accesorios solo considera las conexiones entre tuberías y no válvulas, por lo que este valor está subdimensionado.

Tabla 4.45: Costo de inversión en red de distribución - caso 35 °C [57] [2] [31]

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Tubería preaislada	\$ 7.617.880	\$21.836.260	\$ 31.445.900	\$ 50.303.120	\$ 65.619.290	\$ 91.559.900	\$ 123.125.340
Bombas circuladoras	\$ 1.798.720	\$ 3.673.120	\$ 4.326.080	\$ 7.346.240	\$ 8.652.160	\$ 12.077.120	\$ 12.740.640
Vaso de expansión	\$ 38.772	\$ 65.369	\$ 75.600	\$ 123.120	\$ 203.760	\$ 255.600	\$ 255.600
Excavaciones, mano de obra	\$ 3.360.870	\$ 7.215.985	\$ 9.983.761	\$ 17.397.444	\$ 21.697.381	\$ 36.496.134	\$ 49.101.997
Accesorios	\$ 1.154.722	\$ 2.309.444	\$ 3.464.166	\$ 4.618.888	\$ 6.928.332	\$ 9.237.776	\$ 11.547.220
Total	\$ 13.970.964	\$ 35.100.178	\$ 49.295.507	\$ 79.788.812	\$ 103.100.923	\$ 149.626.530	\$ 196.770.797

Tabla 4.46: Costo de inversión en red de distribución - caso 55 °C [57] [2] [31]

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Tubería preaislada	\$ 7.617.880	\$ 15.432.700	\$ 26.060.580	\$ 34.864.400	\$ 53.915.550	\$ 91.559.900	\$ 100.251.060
Bombas circuladoras	\$ 413.600	\$ 2.469.280	\$ 2.469.280	\$ 4.938.560	\$ 10.584.640	\$ 8.652.160	\$ 15.876.960
Vaso de expansión	\$ 30.031	\$ 38.772	\$ 75.600	\$ 123.120	\$ 123.120	\$ 203.760	\$ 146.880
Excavaciones, mano de obra	\$ 3.360.870	\$ 7.215.985	\$ 9.983.761	\$ 17.397.444	\$ 21.697.381	\$ 30.148.980	\$ 42.406.270
Accesorios	\$ 1.154.722	\$ 2.309.444	\$ 3.464.166	\$ 4.618.888	\$ 6.928.332	\$ 9.237.776	\$ 11.547.220
Total	\$ 12.577.103	\$ 27.466.181	\$ 42.053.387	\$ 61.942.412	\$ 93.249.023	\$ 139.802.576	\$ 170.228.390

Generación

Para estudiar los costos asociados a la generación geotérmica se realizaron cotizaciones de los equipos principales y algunos servicios, siendo algunos valores determinados según estudio del mercado de las bombas de calor geotérmicas en Chile [14].

Con respecto a la instalación de la bomba de calor se considera el valor porcentual con respecto al total del proyecto, que considera el costo por mano de obra y suministro de equipos hidráulicos, cañerías, válvulas y otros subsistemas que se requieran para la instalación del equipo de bomba de calor. Por otro lado, éste excluye el costo por el suministro de la bomba de calor, el sistema de captación y el suministro e instalación de sistemas de distribución y fuentes emisoras. [14]

Tabla 4.47: Costo de instalación BCG [14]

	Unidad	Valor promedio
Circuitos cerrados	%	0,33
Sistemas abierto	%	0,4

Los costos debido a accesorios y fitting se pueden estimar como un 1,3% del total de la inversión [4].

Entonces, los costos debido a generación según tipo de captación son:

Captación horizontal cerrada: el valor de las excavaciones se obtiene calculando el movimiento de tierras en $[m^3]$ y estimando su costo asociado por movimiento de tierras en Chile \$11.433 [49].

Tabla 4.48: Inversión en captación horizontal [2] [33] [26] [49]

Captación horizontal - 55 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$ 11.850.800	\$ 13.226.800	\$ 15.050.00	\$ 22.575.000
Sondas PE100	\$ 1.113.639	\$ 2.226.239	\$ 3.437.006	\$ 4.535.246
Anticongelante	\$ 458.013	\$ 915.598	\$ 1.413.557	\$ 1.865.235
Estanque de inercia	\$ 619.200	\$ 619.200	\$ 1.582.400	\$ 1.582.400
Bombas circuladoras	\$ 1.022.786	\$ 1.023.400	\$ 1.433.476	\$ 1.535.100
Excavaciones	\$ 12.919.267	\$ 26.273.976	\$ 42.611.947	\$ 53.353.230
Instalación	\$ 4.278.265	\$ 5.099.503	\$ 6.100.712	\$ 8.946.380
Vaso de expansión	\$ 30.865	\$ 30.865	\$ 34.765	\$ 34.765
Accesorios	\$ 419.807	\$ 642.403	\$ 931.630	\$ 1.227.556
Total	\$ 32.712.641	\$ 50.057.984	\$ 72.595.494	\$ 95.654.909

Tabla 4.49: Inversión en captación horizontal - 35 °c [2] [33] [26] [49]

Captación horizontal - 35 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$ 11.850.800	\$ 13.226.800	\$ 15.050.00	\$ 15.050.00
Sondas PE100	\$ 1.198.403	\$ 2.423.038	\$ 3.649.768	\$ 4.899.481
Anticongelante	\$ 492.874	\$ 996.537	\$ 1.501.061	\$ 2.015.038
Estanque de inercia	\$ 619.200	\$ 1.247.000	\$ 1.582.400	\$ 1.582.400
Bombas circuladoras	\$ 1.022.786	\$ 859.656	\$ 1.535.100	\$ 1.289.484
Excavaciones	\$ 15.650.757	\$ 27.503.532	\$ 42.542.943	\$ 57.681.485
Instalación	\$ 4.306.237	\$ 5.164.446	\$ 6.170.924	\$ 6.583.329
Vaso de expansión	\$ 30.865	\$ 30.865	\$ 30.865	\$ 30.865
Accesorios	\$ 457.235	\$ 668.874	\$ 936.820	\$ 1.158.717
Total	\$ 35.629.157	\$ 52.120.749	\$ 72.999.881	\$ 90.290.798

Tabla 4.50: Inversión en captación slinky - 35 °c [2] [33] [26] [49]

Captación slinky - 35 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$ 11.850.800	\$ 13.226.800	\$ 15.050.00	\$ 15.050.00
Sondas PE100	\$ 1.221.302	\$ 2.483.371	\$ 3.744.874	\$ 5.030.934
Anticongelante	\$ 502.292	\$ 1.021.350	\$ 1.540.176	\$ 2.069.102
Estanque de inercia	\$ 619.200	\$ 1.247.000	\$ 1.582.400	\$ 1.582.400
Bombas circuladoras	\$ 859.656	\$ 1.022.786	\$ 1.289.484	\$ 1.534.179
Excavaciones	\$ 4.063.901	\$ 8.261.288	\$ 12.443.847	\$ 16.732.770
Instalación	\$ 4.313.794	\$ 5.184.356	\$ 6.202.308	\$ 6.626.708
Vaso de expansión	\$ 30.865	\$ 30.865	\$ 30.865	\$ 30.865
Accesorios	\$ 305.004	\$ 422.212	\$ 544.491	\$ 632.540
Total	\$ 23.766.814	\$ 32.900.028	\$ 42.428.446	\$ 49.289.499

Tabla 4.51: Inversión en captación slinky - 55 °C [2] [33] [26] [49]

Captación slinky - 55 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$ 11.850.800	\$ 13.226.800	\$ 15.050.00	\$ 22.575.000
Sondas PE100	\$ 1.093.731	\$ 2.198.140	\$ 3.319.531	\$ 4.562.524
Anticongelante	\$ 449.825	\$ 904.042	\$ 1.365.243	\$ 1.876.456
Estanque de inercia	\$ 619.200	\$ 1.247.000	\$ 1.582.400	\$ 1.582.400
Bombas circuladoras	\$ 859.656	\$ 955.651	\$ 1.433.476	\$ 1.433.476
Excavaciones	\$ 3.633.208	\$ 7.301.379	\$ 11.025.155	\$ 15.173.057
Instalación	\$ 4.271.695	\$ 5.090.230	\$ 6.061.945	\$ 8.955.383
Vaso de expansión	\$ 30.858	\$ 30.858	\$ 34.765	\$ 39.849
Accesorios	\$ 296.116	\$ 393.841	\$ 517.891	\$ 730.058
Total	\$ 23.074.232	\$ 30.689.283	\$ 40.355.642	\$ 56.888.353

Captación vertical cerrada: el valor de las perforaciones se cotiza con empresa Aysén Drilling con un valor de 135.000 [\$/m] para perforaciones de hasta 80 [m] y de 155 [\$/m] para perforaciones de hasta 130 [m] (Anexo D.9.2). Además de un valor de \$ 350.000 por pozo perforado.

Para el caso en que las perforaciones son de hasta 80 [m] de profundidad se tiene:

Tabla 4.52: Inversión en captación vertical U - 55 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical U - 55 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 22.575.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 105.637.230	\$ 155.609.282	\$ 208.966.243	\$ 253.345.000
Sondas PE100	\$ 3.270.871	\$ 4.880.264	\$ 6.553.660	\$ 7.555.960
Anticongelante	\$ 3.085.085	\$ 6.272.710	\$ 9.235.975	\$ 12.402.904
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 1.797.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400
Bombas circuladoras	\$ 2.413.160	\$ 3.219.840	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080
Instalación	\$ 8.529.137	\$ 10.096.107	\$ 13.089.008	\$ 13.419.767
Accesorios	\$ 1.912.207	\$ 2.698.665	\$ 3.608.142	\$ 4.243.565
Total	\$ 149.005.091	\$ 210.288.268	\$ 281.157.508	\$ 330.671.676

Tabla 4.53: Inversión en captación vertical U - 35 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical U - 35 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$15.050.000	\$ 25.714.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 121.261.368	\$ 183.904.361	\$ 239.017.116	\$ 302.230.097
Sondas PE100	\$ 3.616.594	\$ 5.587.631	\$ 7.226.053	\$ 9.159.890
Anticongelante	\$ 3.640.223	\$ 7.209.499	\$ 10.927.168	\$ 14.204.200
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400	\$ 5.314.800
Bombas circuladoras	\$ 2.624.720	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080
Instalación	\$ 6.159.976	\$ 10.329.538	\$ 10.870.217	\$ 13.949.064
Accesorios	\$ 2.001.159	\$ 3.111.414	\$ 3.904.537	\$ 4.964.767
Total	\$ 155.936.439	\$ 242.450.923	\$ 304.253.572	\$ 386.869.898

Tabla 4.54: Inversión en captación vertical 2U - 35 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical 2U - 35 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$15.050.000	\$ 25.714.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 62.039.329	\$ 93.410.238	\$ 120.005.847	\$ 152.228.087
Sondas PE100	\$ 2.621.252	\$ 3.946.718	\$ 4.759.705	\$ 6.112.629
Anticongelante	\$ 2.293.573	\$ 4.754.618	\$ 7.158.847	\$ 9.216.847
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400	\$ 5.314.800
Bombas circuladoras	\$ 3.140.720	\$ 3.140.720	\$ 4.105.640	\$ 4.881.360
Instalación	\$ 5.831.513	\$ 9.788.037	\$ 10.056.323	\$ 12.943.468
Accesorios	\$ 1.203.264	\$ 1.864.353	\$ 2.267.951	\$ 2.909.493
Total	\$ 93.762.051	\$ 145.276.084	\$ 176.725.713	\$ 226.716.684

Tabla 4.55: Inversión en captación vertical 2U - 55 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical 2U - 55 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 22.575.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 53.234.454	\$ 76.446.588	\$ 105.074.676	\$ 128.364.311
Sondas PE100	\$ 2.191.995	\$ 3.032.046	\$ 4.382.341	\$ 5.219.153
Anticongelante	\$ 2.061.774	\$ 4.083.461	\$ 5.871.352	\$ 8.056.431
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 1.797.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400
Bombas circuladoras	\$ 2.330.600	\$ 3.254.240	\$ 3.140.720	\$ 4.865.880
Instalación	\$ 8.173.108	\$ 9.486.195	\$ 12.372.473	\$ 12.648.621
Accesorios	\$ 1.197.941	\$ 1.609.581	\$ 2.165.917	\$ 2.533.983
Total	\$93.347.273	\$125.423.511	\$168.774.879	\$197.455.779

Mientras que para el caso en que las perforaciones bordean los 120 [m] de profundidad se tiene:

Tabla 4.56: Inversión en captación vertical U - 55 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical U - 55 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 22.575.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 104.945.833	\$ 142.765.026	\$ 205.138.023	\$ 254.450.000
Sondas PE100	\$ 2.878.033	\$ 3.626.970	\$ 5.298.240	\$ 6.739.992
Anticongelante	\$ 2.684.378	\$ 5.500.819	\$ 7.494.348	\$ 10.765.204
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 1.797.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400
Bombas circuladoras	\$ 2.330.600	\$ 3.254.240	\$ 3.589.640	\$ 4.881.360
Instalación	\$ 8.399.501	\$ 9.682.520	\$ 12.674.719	\$ 13.150.497
Accesorios	\$ 1.890.145	\$ 2.500.433	\$ 3.509.511	\$ 4.234.808
Total	\$ 147.285.889	\$ 194.841.408	\$ 273.471.881	\$ 329.989.262

Tabla 4.57: Inversión en captación vertical U - 35 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical U - 35 °C				
Viviendas	5	10	15	20
Bomba de calor	\$15.050.000	\$ 25.714.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 120.932.011	\$ 181.591.725	\$ 239.455.125	\$ 282.415.133
Sondas PE100	\$ 3.345.980	\$ 4.810.088	\$ 6.236.430	\$ 7.174.805
Anticongelante	\$ 2.922.163	\$ 6.337.599	\$ 9.524.880	\$ 12.564.076
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400	\$ 5.314.800
Bombas circuladoras	\$ 3.254.240	\$ 3.589.640	\$ 4.881.360	\$ 5.384.460
Instalación	\$ 6.070.673	\$ 10.072.949	\$ 10.543.642	\$ 13.293.986
Accesorios	\$ 1.991.047	\$ 3.052.054	\$ 3.887.167	\$ 4.670.344
Total	\$ 155.148.515	\$ 237.825.454	\$ 302.900.002	\$ 363.927.603

Tabla 4.58: Inversión en captación vertical 2U - 35 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical 2U - 35 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 15.050.000	\$ 25.714.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 58.109.647	\$ 93.626.628	\$ 115.542.289	\$ 146.089.054
Sondas PE100	\$ 1.930.439	\$ 3.187.926	\$ 3.838.387	\$ 4.892.865
Anticongelante	\$ 2.293.573	\$ 3.941.159	\$ 6.347.064	\$ 7.836.402
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400	\$ 5.314.800
Bombas circuladoras	\$ 4.105.640	\$ 4.865.880	\$ 4.711.080	\$ 6.158.460
Instalación	\$ 5.603.545	\$ 9.537.636	\$ 9.752.288	\$ 12.540.946
Accesorios	\$ 1.152.778	\$ 1.865.898	\$ 2.191.313	\$ 2.807.253
Total	\$ 89.828.022	\$ 145.396.527	\$ 170.753.821	\$ 218.749.780

Tabla 4.59: Inversión en captación vertical 2U - 55 °C [2] [33] [26] [49]

Captación vertical 2U - 55 °C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 22.575.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000	\$ 33.110.000
Perforaciones	\$ 47.231.663	\$ 64.361.568	\$ 92.773.461	\$ 114.226.806
Sondas PE100	\$ 1.310.964	\$ 1.698.990	\$ 2.619.966	\$ 3.040.110
Anticongelante	\$ 1.865.487	\$ 3.663.285	\$ 4.997.436	\$ 7.192.649
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 1.797.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400
Bombas circuladoras	\$ 3.254.240	\$ 4.105.640	\$ 4.105.640	\$ 4.711.080
Instalación	\$ 7.882.368	\$ 9.046.287	\$ 11.790.889	\$ 11.929.536
Accesorios	\$ 1.114.128	\$ 1.435.033	\$ 1.976.712	\$ 2.299.279
Total	\$ 86.816.250	\$ 111.822.203	\$ 154.031.504	\$ 179.166.860

Captación abierto: el valor de los pozos de captación y reinyección así como su habilitación se obtiene de los costos del colegio de Coyhaique [44]:

Tabla 4.60: Inversión en captación vertical abierta - 55 °C [2] [26] [44]

Vertical abierto - 55°C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$ 22.575.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000	\$ 33.110.000
Pozos y habilitación	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000
Intercambiador de placas	\$ 3.655.000	4.635.400	\$ 4.635.400	\$ 6.355.400
Bombas circuladoras	\$ 2.413.160	\$ 3.219.840	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080
Instalación	\$ 11.124.960	\$ 12.858.720	\$ 16.161.120	\$ 16.849.120
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 1.797.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400
Accesorios	\$ 932.042	\$ 1.021.415	\$ 1.180.998	\$ 1.212.302
Total	\$ 72.627.562	\$ 79.591.775	\$ 92.026.998	\$ 94.446.302

Tabla 4.61: Inversión en captación vertical abierta - 35°C [2] [26] [44]

Vertical abierto - 35°C				
Viviendas	20	30	40	50
Bomba de calor	\$15.050.000	\$ 25.714.000	\$ 25.714.000	\$ 33.110.000
Pozos y habilitación	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000	\$ 30.345.000
Intercambiador de placas	\$ 3.655.000	\$ 3.655.000	\$ 7.310.000	\$ 3.655.000
Bombas circulatoras	\$ 2.624.720	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080	\$ 3.937.080
Instalación	\$ 6.020.000	\$ 10.285.600	\$ 10.285.600	\$13.255.00
Estanque inercia	\$ 1.582.400	\$ 2.657.400	\$ 2.657.400	\$ 5.314.800
Accesorios	\$ 770.603	\$ 995.723	\$ 1.043.238	\$ 1.164.876
Total	\$ 60.047.723	\$ 77.589.803	\$ 81.292.318	\$ 90.770.756

4.4.2. Costos mantención

Para los costos de mantención preventiva se utiliza un indicador para el precio por kWt asociado al servicio de mantención preventiva de bombas de calor geotérmicas y su sistema de captación, excluyendo los sistemas de distribución y fuentes emisoras:

Tabla 4.62: Costo de mantención preventiva BCG según potencia [14]

	Unidad	Valor promedio
Potencia bomba de calor <20 kWt	\$/ kWt	10.591
Potencia bomba de calor >20 y <100 kWt	\$/ kWt	10.650
Potencia bomba de calor >100 kWt	\$/ kWt	12.200

Los costos de mantención para distribución y fuentes emisoras se estima como un 2% del valor de la inversión inicial según la guía de calefacción distrital de ASHRAE [41].

4.4.3. Costos operacionales

La energía eléctrica consumida en la comuna de Cochrane proviene del Sistema Mediano General Carrera el cual está compuesto por dos generadoras eléctricas, la central Cochrane y la central El Traro, termoeléctricas a petróleo diésel y mixta de hidráulica de pasada y diésel respectivamente. Ambas son de propiedad de la empresa Edelaysén.

En cuanto al precio de la electricidad este corresponde a 145 \$/kWh y con el límite de invierno a 225 \$/kWh. Sin embargo el gobierno anunció un plan de reducción de 20% en las tarifas de calefacción eléctrica, iniciativa que permite generar una reconversión energética residencial, pensada para calefacción eléctrica. Esta tarifa ofrece un valor especial que hace más competitiva la calefacción eléctrica potenciando su uso en ciudades con altos niveles de contaminación.

En el caso de la región de Aysén, este beneficio empezó a funcionar en abril del año 2019 con lo que se denominó “EcoAyre, Aysén Renovación Energética”. De esta forma, los clientes

de la empresa eléctrica Edelaysén en Cochrane pueden acceder a una tarifa especial con un valor de \$100 kWh + IVA, la cual, aparte de ser más barata, no tiene límite de invierno. Esta tarifa es aproximadamente un 20 % más económica que la tarifa residencial convencional [54].

Una vez que se conoce la tarifa eléctrica se determina el consumo anual de bombas de circulación, equipos de calefacción, bombas de calor geotérmicas:

Tabla 4.63: Consumo eléctrico en BCG y distribución

Consumo eléctrico anual de bombas del sistema [kWh /año]								
Viviendas		5	10	15	20	30	40	50
55 °C	Bomba de calor	8678	17357	26035	33629	53806	71741	91196
	Bombas distribución	10	17	50	17	74	101	150
35°C	Bomba de calor	5325	10649	15648	21079	30669	42596	52159
	Bombas distribución	26	62	149	82	138	255	208

Además, según el sistema de generación se requerirán distintas capacidades de bombeo:

Tabla 4.64: Consumo eléctrico en bombeo de sistema geotérmico

Consumo eléctrico según sistema de generación [kWh/año]					
Viviendas		5	10	15	20
55°C	Horizontal	35	58	104	115
	Slinky	35	81	146	142
35°C	Horizontal	44	81	109	124
	Slinky	58	92	161	192

El consumo eléctrico en generación para los sistemas verticales se muestra a continuación, donde para los cerrados se subdivide además el consumo para el caso de perforaciones de 80 o 120 [m]. Se presenta de la forma Caso 80 [m]/Caso 120 [m]:

Tabla 4.65: Consumo eléctrico en bombeo de sistema geotérmico

Consumo eléctrico según sistema de generación [kWh/año]					
Viviendas		20	30	40	50
55°C	Abierto	735	945	1299	1637
	Vertical U	54 / 98	100 / 134	95 / 177	179 / 229
	Vertical 2U	91 / 140	121 / 231	177 / 177	229 / 251
35°C	Abierto	737	1074	1410	1860
	Vertical U	71 / 98	112 / 167	114 /171	205 / 307
	Vertical 2U	90/219	161/264	198/361	267/481

4.4.4. Otras tecnologías

Finalmente, se estudian los costos nivelados de energía de otras tecnologías, para esto se consideran los resultados obtenidos por proyecto de estudio de calefacción distrital en toda la ciudad de Coyhaique.

Este estudio arrojó que los sistemas de calefacción con caldera a base de pellet de madera resultan en un LCOE de 75 [\$/kWh], sistemas en base a gas resultan en LCOEs del orden de 118 [\$/kWh] y bordeando los 80 [\$/kWh], se posiciona el sistema de red de energía en base a intercambiadores aire-glicol [53].

Capítulo 5

Resultados

5.1. Cargas térmicas

Tal como se mostró antes, la carga térmica de diseño es de 2536 [W] por vivienda. A continuación se muestran las distintas cargas promedios diarias para cada mes. La línea roja muestra el resultado del balance de cargas térmicas:

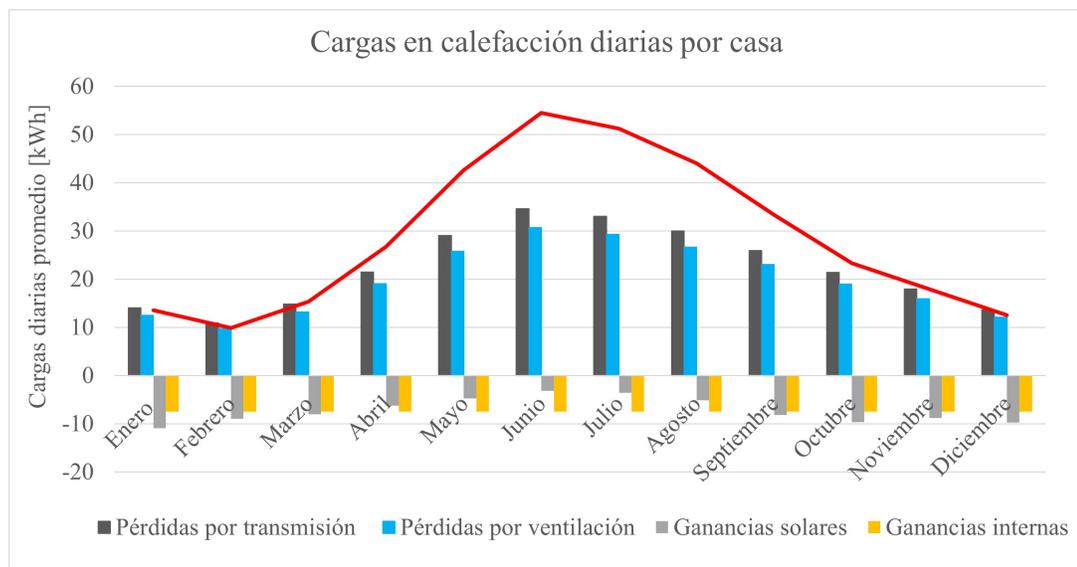


Figura 5.1: Cargas térmicas promedio diarias

Considerando el abastecimiento de calefacción en todo momento que se requiera, la demanda anual es de 181,53 [kWh/m²año] y al considerar el uso solo de día (de 6:00 a 23:00) la demanda anual por vivienda es de 110,16 [kWh/m²año].

A continuación se muestran las cargas en calefacción por hora para los meses de Junio (mes donde la demanda en calefacción es mayor) y para el mes de Enero (mes con menor carga en calefacción):

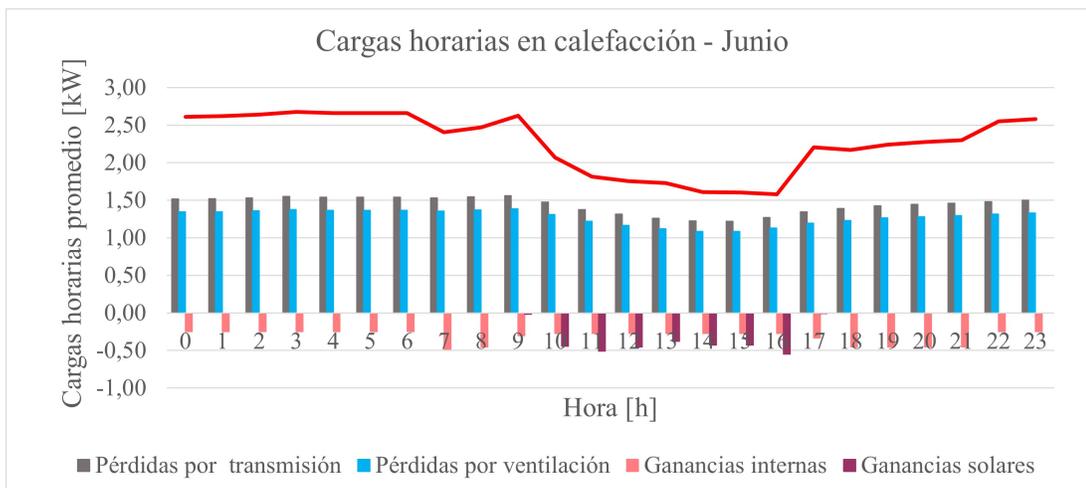


Figura 5.2: Cargas térmicas horarias promedio para mes de Junio

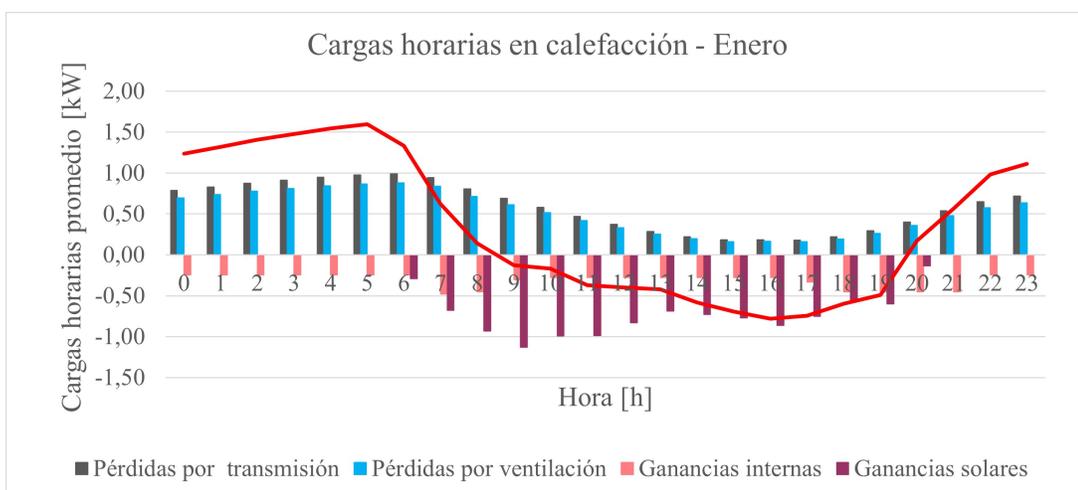


Figura 5.3: Cargas térmicas horarias promedio para mes de Enero

A pesar de escapar de los alcances del estudio, como las cargas en calefacción son negativas en algunas horas del verano, se evalúan las cargas en refrigeración resultando en una demanda máxima de 830 [W], 747 [W] de diseño y una demanda total anual de 9,4 [kWh/m²año].

5.2. Red de distribución

Las pérdidas térmicas totales máximas (en ida y retorno) asociadas a la distribución de agua caliente a 35 o 55 °C así como el % de pérdidas asociado al calor total que se genera es:

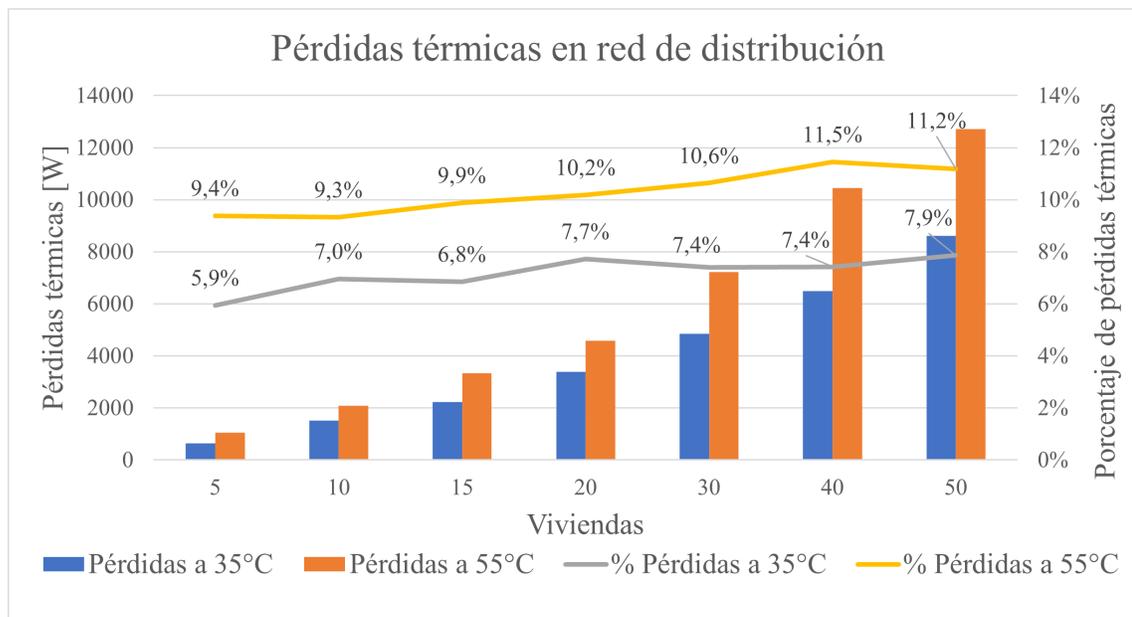


Figura 5.4: Pérdidas térmicas

Con las potencias anuales de cada conjunto habitacional y los largos de cañería se determina la densidad de conexión:

Tabla 5.1: Densidad de conexión

Viviendas	5	10	15	20	30	40	50
Densidad 35°C [MWh/m]	0,32	0,33	0,33	0,30	0,33	0,31	0,31
Densidad 55°C [MWh/m]	0,33	0,34	0,34	0,31	0,34	0,33	0,32

Con respecto a las pérdidas de carga máxima son:

Tabla 5.2: Pérdida de carga y velocidad en red de distribución

Viviendas		5	10	15	20	30	40	50
35 °C	Pérdida de carga [m.c.a.]	3,0	2,9	5,1	3,6	4,8	6,3	6,3
	Velocidad fluido [m/s]	0,6	0,5	0,8	0,5	0,8	0,7	0,9
55 °C	Pérdida de carga [m.c.a.]	0,9	1,3	3,1	1,4	3,1	3,1	5,0
	Velocidad fluido [m/s]	0,34	0,42	0,62	0,42	0,63	0,54	0,70

Las pérdidas de carga por metro, con un límite de 100 [Pa/m] son:

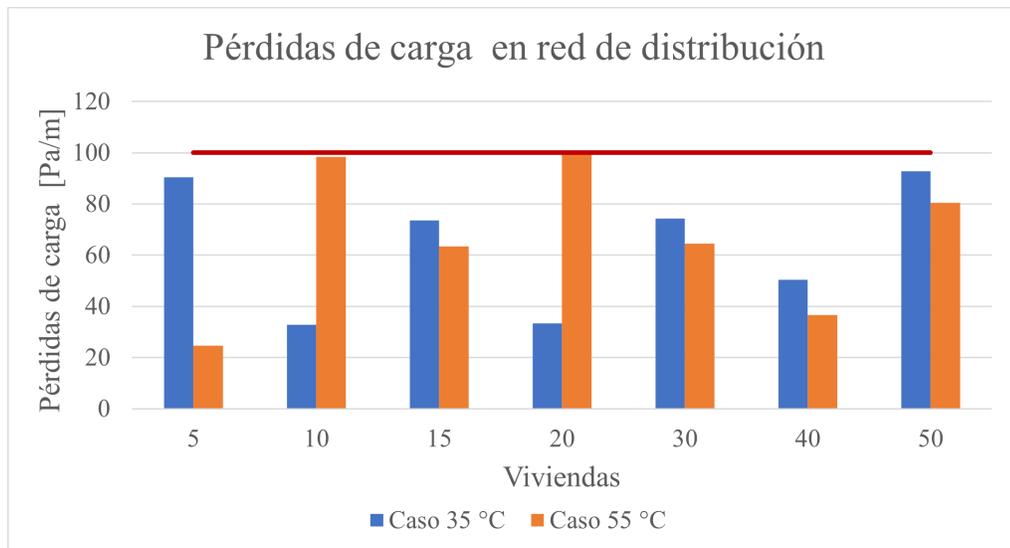


Figura 5.5: Pérdidas de carga por metro en red de distribución

5.3. Sistema de generación con energía geotérmica

Los largos requeridos para cada sistema de captación, temperatura de operación y número de viviendas se muestra a continuación:

Horizontal

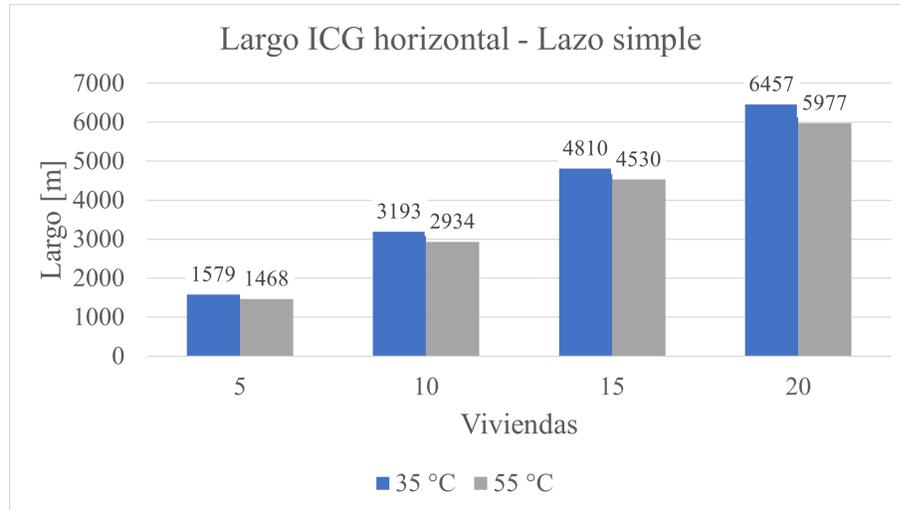


Figura 5.6: Largo intercambiador Horizontal

Tabla 5.3: Resultados para intercambiador Horizontal

Viviendas	5		10		15		20	
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
N° trincheras	60	50	104	100	160	160	216	200
Rendimiento sistema [W/m]	7	8	7	8	7	7	7	8
Superficie [m ²]	913	753	1604	1540	2481	2485	3364	3111

Slinky

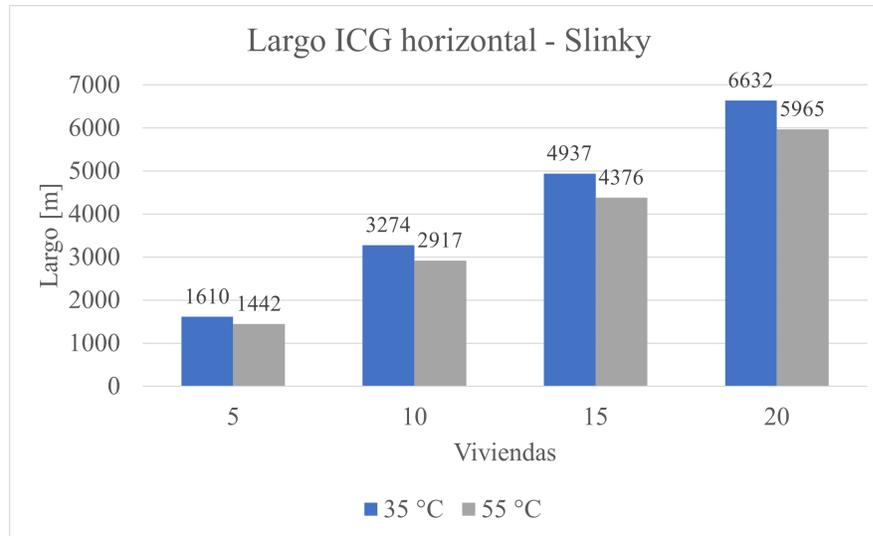


Figura 5.7: Largo intercambiador Horizontal - Slinky

Tabla 5.4: Resultados para intercambiador Slinky

Viviendas	5		10		15		20	
	35	55	35	55	35	55	35	55
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
N° trincheras	5	4	10	8	14	12	20	18
Rendimiento sistema [W/m]	7	8	7	8	7	8	7	7
Superficie [m^2]	891	757	1993	1721	3080	2700	4219	3808

Vertical cerrado simple U

Para el caso de perforaciones de hasta 80 [m] se tiene:

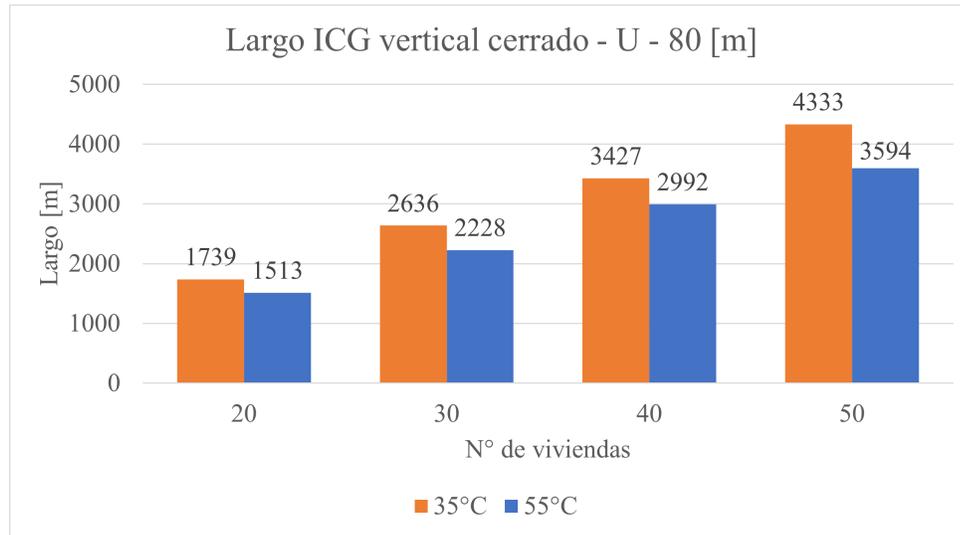


Figura 5.8: Largo intercambiador vertical U - 80 [m]

Tabla 5.5: Resultados para intercambiador vertical U - 80 [m]

Viviendas	20		30		40		50	
	35	55	35	55	35	55	35	55
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
Nº perforaciones	12	10	18	15	22	20	29	24
Rendimiento sistema [W/m]	24	29	24	29	25	29	25	30
Superficie [m ²]	449	337	674	562	824	749	1011	899

Y para el intercambiador de mayor profundidad se obtienen los siguientes valores:

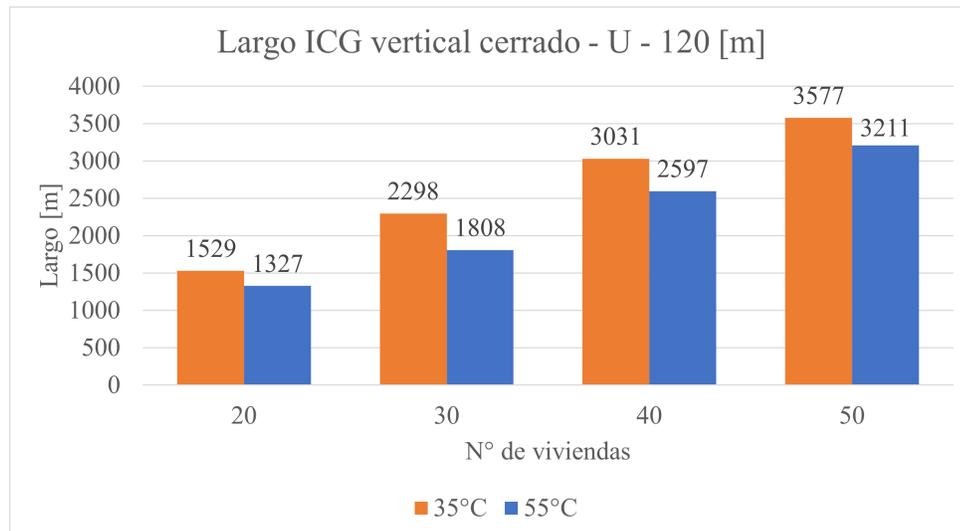


Figura 5.9: Largo intercambiador vertical U - 120 [m]

Tabla 5.6: Resultados para intercambiador vertical U - 120 [m]

Viviendas	20		30		40		50	
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
N° perforaciones	7	6	10	8	13	11	15	14
Rendimiento sistema [W/m]	29	33	28	36	29	34	31	34
Superficie [m ²]	262	225	375	300	524	449	599	524

Vertical cerrado 2U

Para el intercambiador de menor profundidad se obtiene:

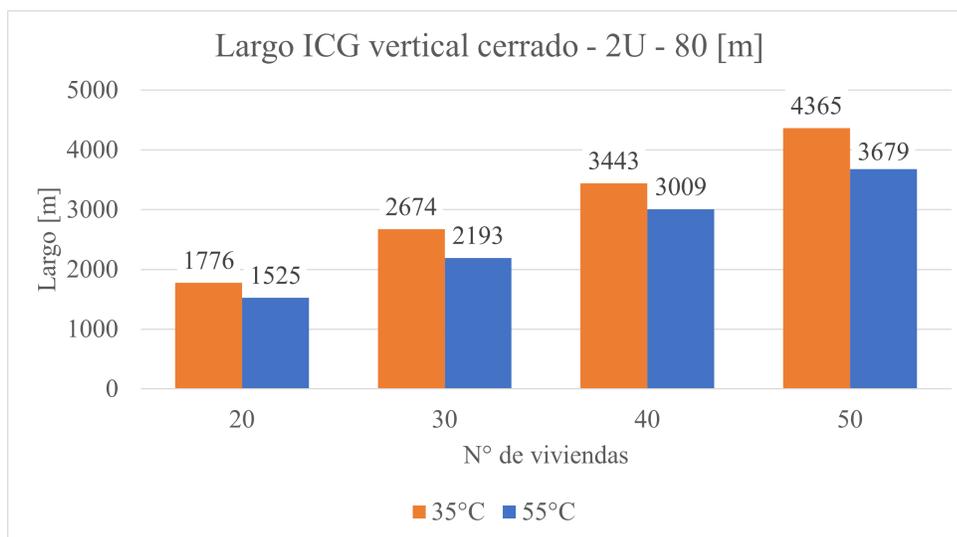


Figura 5.10: Largo intercambiador vertical 2U - 80 [m]

Tabla 5.7: Resultados para intercambiador vertical 2U - 80 [m]

Viviendas	20		30		40		50	
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
N° perforaciones	6	5	9	7	11	10	14	12
Rendimiento sistema [W/m]	25	29	24	30	25	29	25	30
Superficie [m ²]	227	189	378	265	545	378	530	454

Y para el intercambiador de mayor profundidad se obtiene:

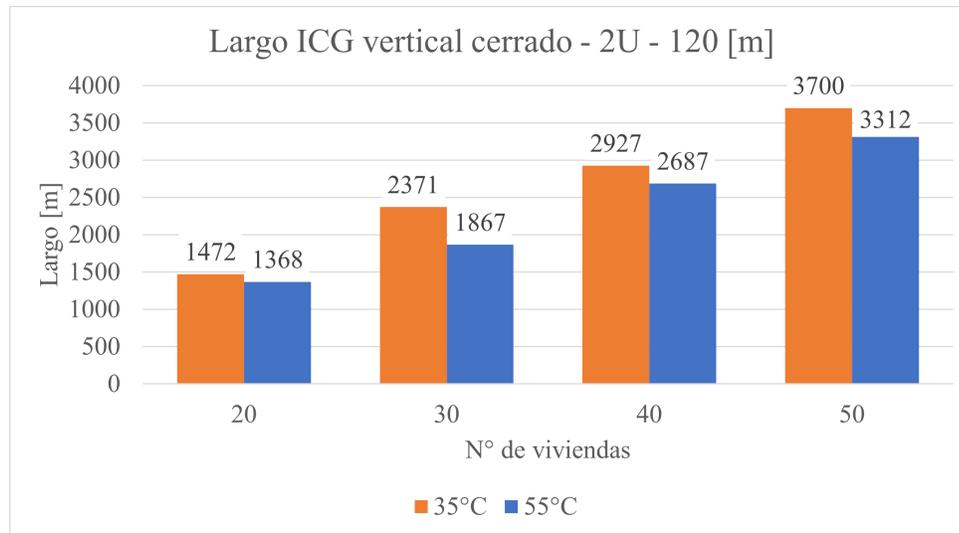


Figura 5.11: Largo intercambiador vertical 2U - 120 [m]

Tabla 5.8: Resultados para intercambiador vertical 2U - 120 [m]

Viviendas	20		30		40		50	
	35	55	35	55	35	55	35	55
Temperatura [°C]	35	55	35	55	35	55	35	55
N° perforaciones	3	3	5	4	6	6	8	7
Rendimiento sistema [W/m]	30	32	28	35	30	33	30	33
Superficie [m ²]	113	151	189	151	227	227	303	303

Vertical abierto

Para el sistema vertical abierto se determina el caudal de agua requerido a extraer:

Tabla 5.9: Caudal pozo

Viviendas		20	30	40	50
35 °C	Potencia suelo [kW]	36,5	54,9	72,5	91,2
	Caudal pozo [l/s]	2,2	3,3	4,4	5,5
55°C	Potencia suelo [kW]	30,9	46,1	61,5	76,2
	Caudal pozo [l/s]	1,9	2,8	3,7	4,6

En todos los casos, el caudal requerido es menor a 8 [l/s] por lo que bastaría con 1 pozo de captación y 1 pozo de reinyección.

Comparación entre los sistemas de captación cerrada

Para poder comparar los distintos sistemas de captación geotérmica cerrada se fija el parámetro de 20 viviendas pues es el común, nuevamente se subdividen los casos de captación cerrada para profundidades de hasta 80 [m] o las que bordean los 120 [m]:

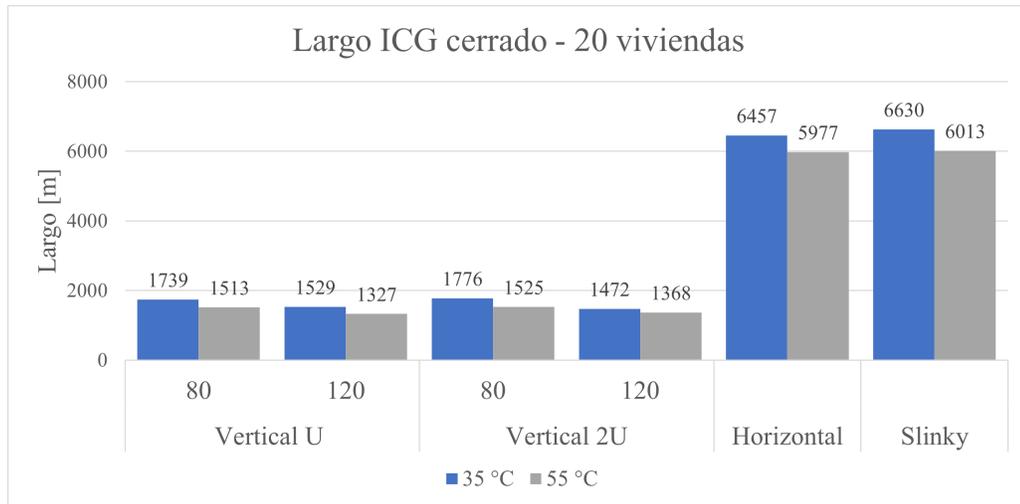


Figura 5.12: Largos de los distintos tipos de sistemas de captación

Además se comparan los rendimientos térmicos:

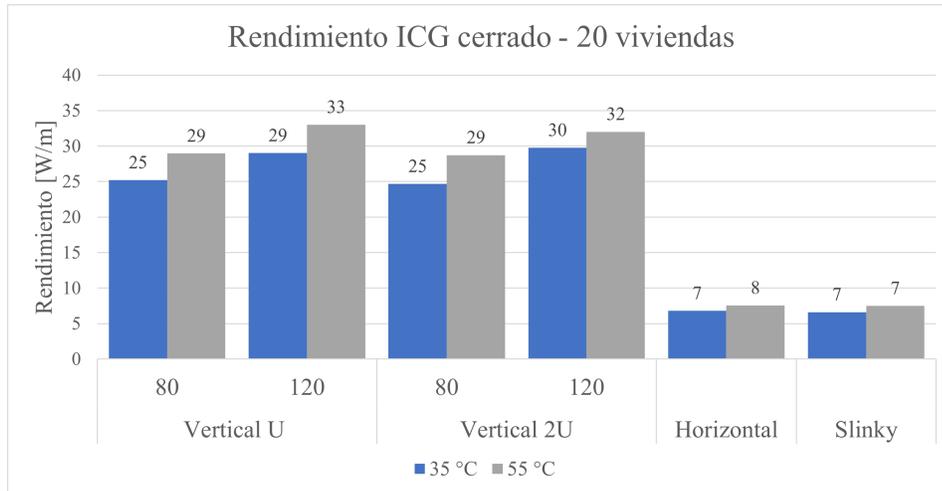


Figura 5.13: Rendimientos de los distintos tipos de sistemas de captación

Y el número de perforaciones o trincheras requerido para este caso de 20 viviendas es:

Tabla 5.10: Número de perforaciones o trincheras según sistema de captación

Sistema geotérmico	Vertical U		Vertical 2U		Horizontal	Slinky
	80	120	80	120		
35 °C	11	7	6	3	216	20
55 °C	10	6	5	3	200	18

Para visualizar la configuración general y balance energético del proceso, a continuación se presenta el diagrama general que muestra los resultados del dimensionamiento para el caso de 20 viviendas que utilizan suelo radiante y sistema de captación geotérmica cerrada vertical doble (2U).

$$\begin{aligned}
 Q_{viviendas} + Q_{pérdidas} &= Q_{totalBCG} = W_{compresor} + Q_{suelo} \\
 40,4 [kW] + 3,4 [kW] &= 43,8 [kW] = 9 [kW] + 34,8 [kW]
 \end{aligned}$$

119

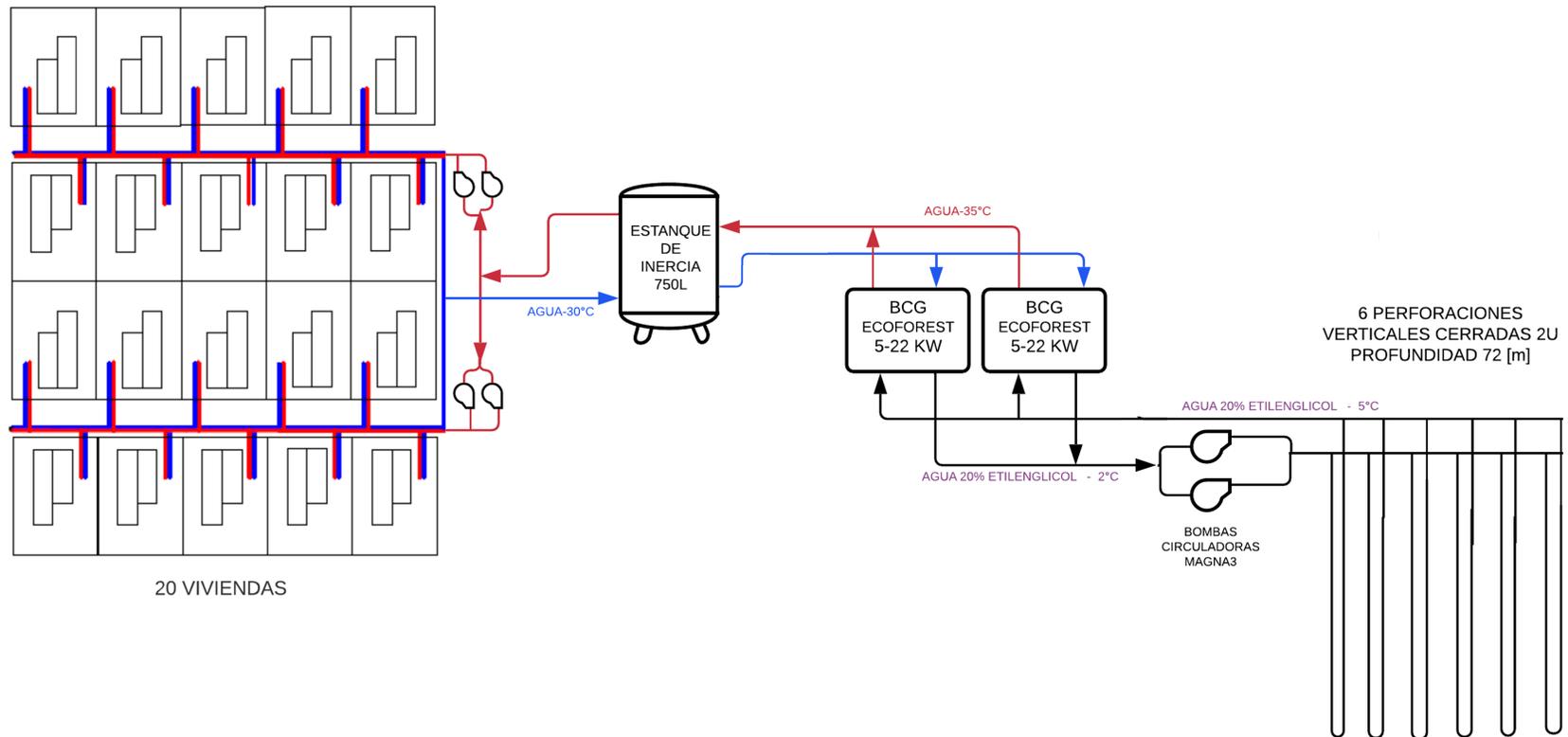


Figura 5.14: Esquema general para 20 viviendas que utiliza sistema vertical 2U con profundidad de 72 [m]

5.4. Costos proyecto

En el capítulo anterior se mostró con detalle los costos asociados a cada parte de los distintos sistemas. A continuación se presenta el resumen de los resultados de costos en inversión, mantenimiento y operación, junto con el LCOE de cada sistema.

En primer lugar, se compara el valor de la inversión en generación en los sistemas verticales cerrados cuando la perforación bordea los 80 [m] y cuando bordea los 120 [m], se muestra el caso para 20 viviendas:

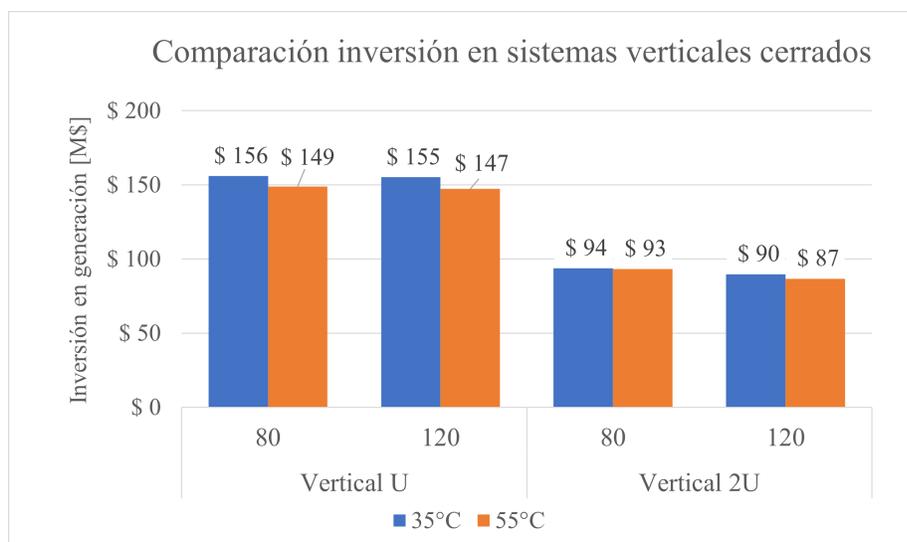


Figura 5.15: Comparación en la inversión en generación con perforaciones de 80 y 120 [m]

En la siguiente tabla se puede observar la distribución de la inversión por área para los distintos tipos de sistemas geotérmicos para el caso de suelo radiante, para los sistemas verticales cerrados los valores corresponden al caso de hasta 80 [m] de profundidad:

Tabla 5.11: Resumen de la inversión - Suelo radiante - 20 viviendas

	Slinky	Horizontal	Vertical U	Vertical 2U	Abierto
Vivienda	\$ 84.075.732	\$ 84.075.732	\$ 84.075.732	\$ 84.075.732	\$ 84.075.732
Distribución	\$ 79.788.812	\$ 79.788.812	\$ 79.788.812	\$ 79.788.812	\$ 79.788.812
Generación	\$ 49.289.499	\$ 90.290.798	\$ 155.936.439	\$ 93.762.051	\$ 60.047.723
Ingeniería	\$ 31.973.107	\$ 38.123.301	\$ 47.970.148	\$ 38.643.989	\$ 33.586.840
Total	\$245.127.150	\$292.278.644	\$367.771.131	\$296.270.584	\$257.499.107

En la siguiente figura se muestran los porcentajes promedio de entre todos los números de viviendas que utilizan suelo radiante:

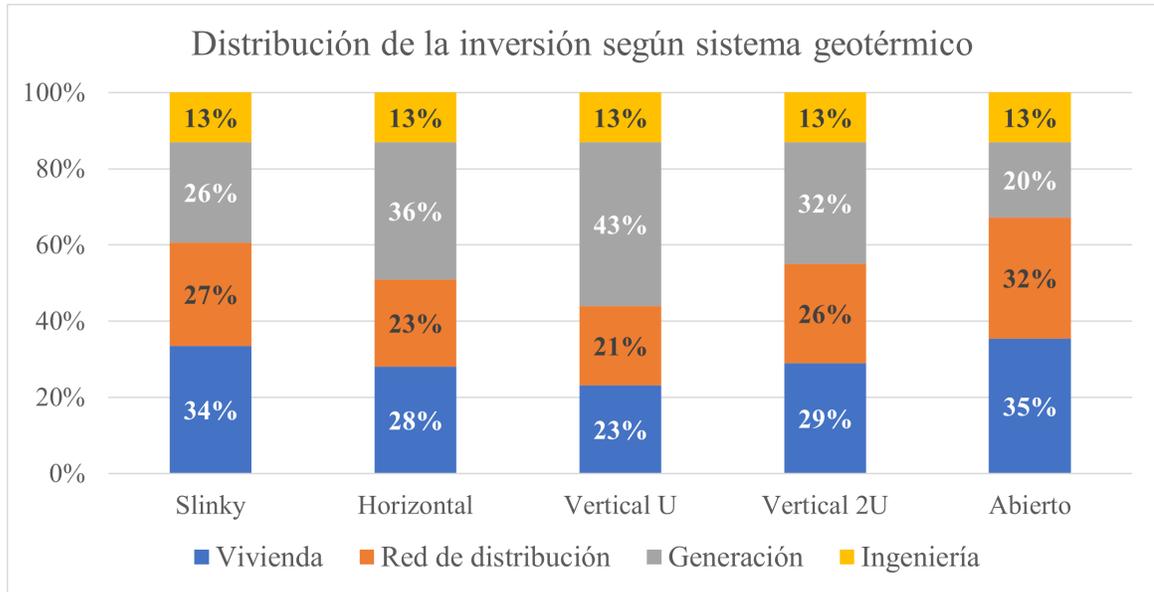


Figura 5.16: Proporción de los costos de inversión en los distintos sistemas de generación

Y además se puede establecer la relación entre la inversión total del proyecto y el número de viviendas con el objetivo de identificar la tendencia de la curva y de esta forma estimar los costos asociados a la incorporación de más viviendas. A continuación se muestra uno de los casos (suelo radiante):

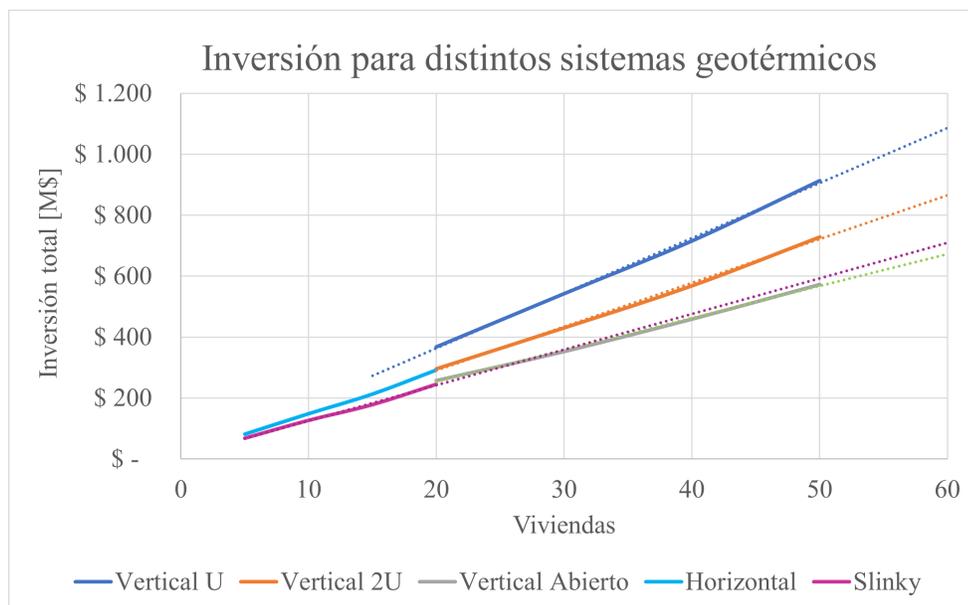


Figura 5.17: Proyección de los costos de inversión en los distintos sistemas de generación según número de viviendas

La tendencia de la inversión es lineal con respecto al número de viviendas, por lo que se determina el valor de inversión por vivienda para los sistemas verticales junto con la

proyección a un proyecto de 10 viviendas más (60 viviendas) para determinar la variación con respecto al caso de menores viviendas (20):

Tabla 5.12: Valor de inversión total por vivienda en sistemas verticales

Viviendas	20	60 (Proyección)	Variación
Abierto	\$ 12.874.955	\$ 11.218.440	12,87 %
Vertical 2U	\$ 14.813.529	\$ 14.415.545	2,69 %
Vertical U	\$ 18.388.557	\$ 18.111.452	1,51 %

Para los sistemas horizontales se evalúa esta variación y proyección al incorporar 5 viviendas extras:

Tabla 5.13: Valor de inversión total por vivienda en sistemas horizontales

Viviendas	5	25 (Proyección)	Variación
Horizontal	\$ 16.242.382	\$ 14.330.008	11,77 %
Slinky	\$ 13.514.044	\$ 12.013.639	11,10 %

Por otro lado, se evalúa el costo eléctrico por vivienda en donde no se distingue entre los casos de perforaciones entre 80 o 120 [m] debido a que la diferencia en el consumo eléctrico es despreciable comparado con el consumo de la bomba de calor geotérmica y otros equipos:

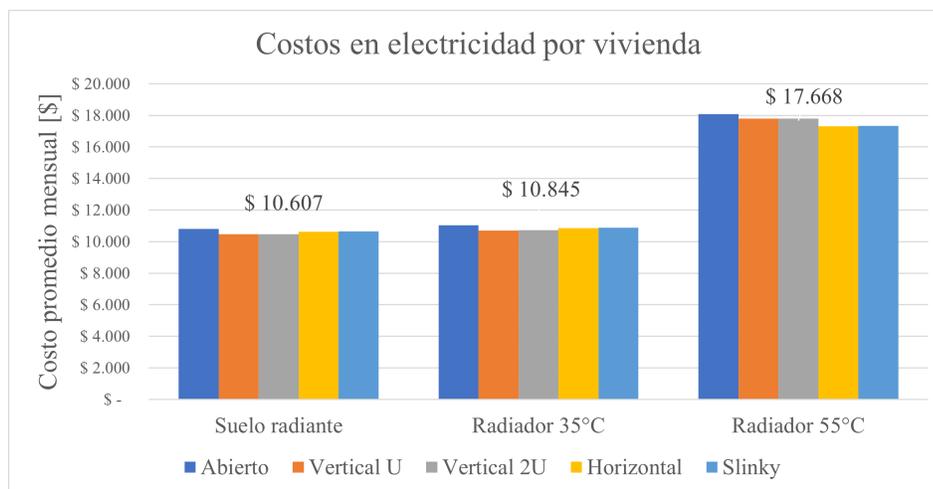


Figura 5.18: Costo mensual en electricidad por vivienda

A continuación se muestran los costos nivelados de energía desde el punto de vista privado para cada sistema según número de vivienda, con el objetivo de identificar el efecto del aumento del tamaño del conjunto habitacional en la rentabilidad:

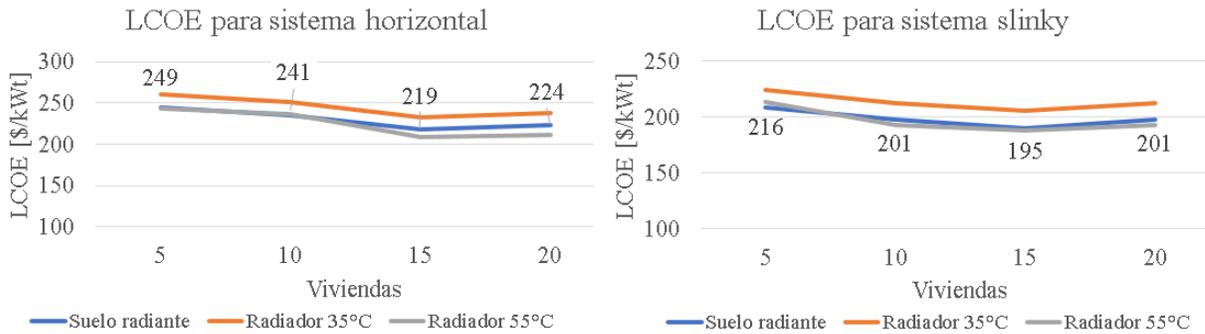


Figura 5.19: LCOE para los distintos números de vivienda - caso horizontal

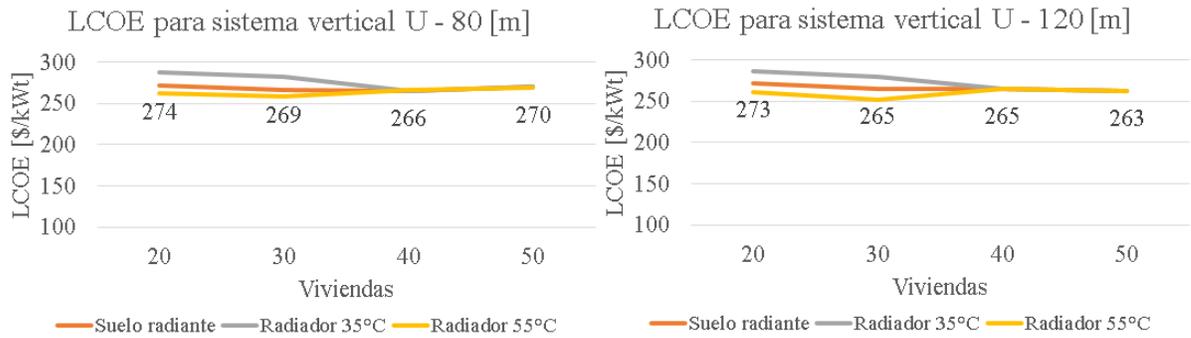


Figura 5.20: LCOE para los distintos números de vivienda - caso vertical cerrado U

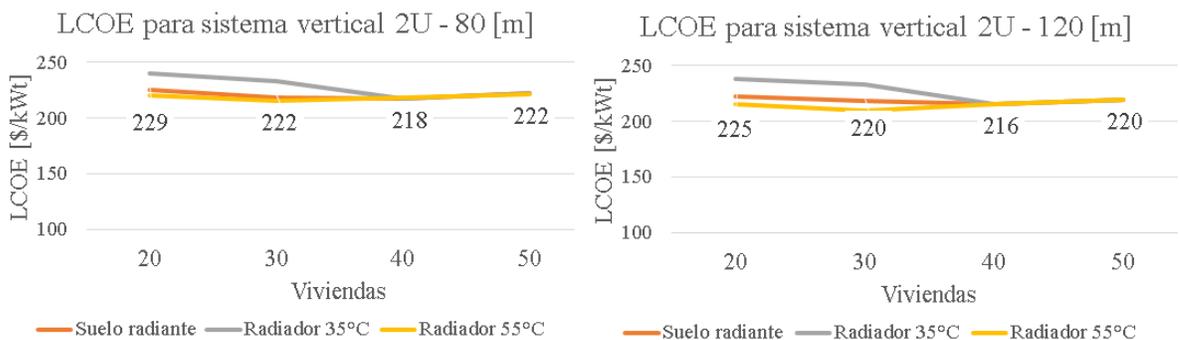


Figura 5.21: LCOE para los distintos números de vivienda - caso vertical cerrado 2U

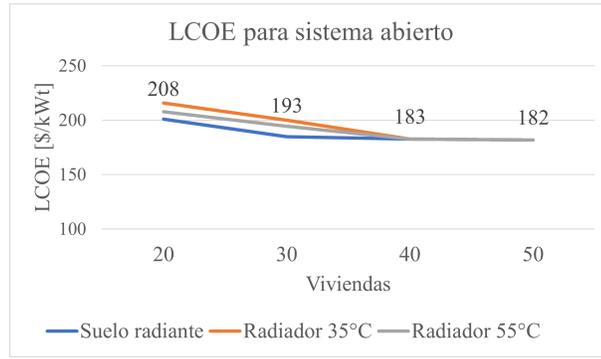


Figura 5.22: LCOE para los distintos números de vivienda - caso abierto

Y para comparar entre los distintos sistemas se puede observar el LCOE promedio:

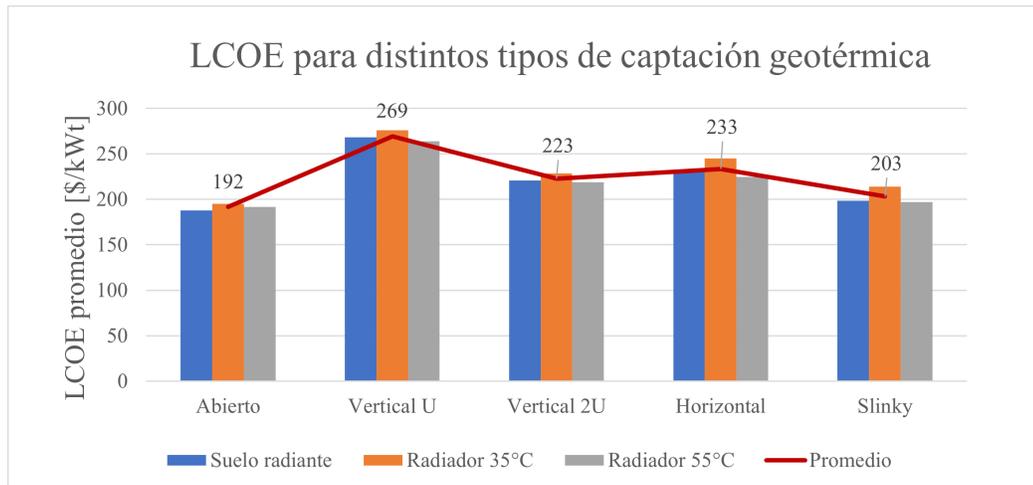


Figura 5.23: LCOE privado promedio según sistema geotérmico

Al utilizar una evaluación pública con tasa de descuento del 6% nominal y 3% real se obtiene:

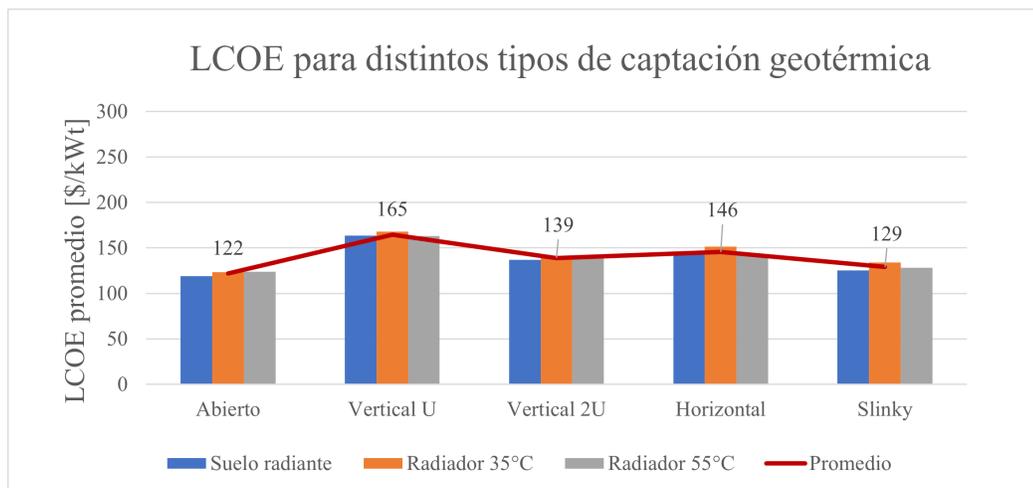


Figura 5.24: LCOE público promedio según sistema geotérmico

No se incluyó descuentos asociados a la disminución de tasas e iva.

Capítulo 6

Análisis de resultados

Viviendas

Dentro de los primeros resultados que se obtienen se encuentran las cargas térmicas de la vivienda, que corresponden principalmente a cargas en calefacción siendo pocas horas al año las que existe demanda en refrigeración. Esto se justifica con la ubicación extrema de la localidad y se evidencia con la gran cantidad de contaminación debido al uso de leña.

El valor obtenido para la demanda anual ($110,16 [kWh/m^2año]$) se encuentra en el orden de lo esperado, dado que según estudio de calefacción en Cochrane, la demanda en calefacción de una vivienda ya existente con reacondicionamiento térmico de 1 piso es de $152,2 [kWh/m^2año]$ [31], por lo que se considera una buena aproximación.

Aún así, este valor está muy por sobre el valor del caso de motivación de las viviendas del condominio Frankfurt en Temuco, donde la carga por vivienda es de solo $27 [kWh/m^2año]$ por lo que el valor obtenido según reglamentación térmica podría no ser suficiente y se podría mejorar aún más con un diseño arquitectónico adecuado. Se propone como solución para la implementación distrital con geotermia, viviendas **passivhaus** que es un estándar referido a viviendas con consumo energético casi nulo basado en un procedimiento exhaustivo en el desarrollo del proyecto y la ejecución.

Para lograr este consumo casi nulo, **passivhaus** exige diseñar y construir viviendas con un alto grado de aislamiento térmico, una envolvente hermética, un control riguroso de los puentes térmicos y de las infiltraciones de aire indeseadas, marcos de ventanas bien aisladas, cristales de alto desempeño y aprovechamiento de la energía del sol de forma tal que mediante un sistema de ventilación mecánica, a través de un recuperador de calor, se consigue el aporte necesario para su climatización, con un aporte energético mínimo adicional [28].

También sería posible disminuir la demanda energética por vivienda al utilizar viviendas pareadas en vez de viviendas aisladas que son las más usuales en esta localidad. El pareo o adosamiento puede llevar a un ahorro considerable de energía dedicada al acondicionamiento térmico. En efecto, según estándares de construcción sustentable para viviendas se establece que se podría reducir la demanda en un 23 % al considerar viviendas pareadas y hasta un 83 % al utilizar vivienda tipo departamento [23].

Lo cual significaría para el caso de viviendas pareadas, una demanda de diseño de 1,95 [kW] y una demanda total anual de 84,8 [kWh/m²año] por vivienda. Por lo que se considera que para mejorar el diseño actual se podría considerar viviendas pareadas y con estándar passivhaus, lo cual podría resultar en grandes ahorros energéticos reduciendo los gastos en generación y distribución de energía, y por lo tanto, mayor factibilidad económica.

Por otro lado, a pesar de que el sistema se diseña solo para calefacción, sí es posible ampliarlo a calefacción y refrigeración. Para hacerlo de forma simultánea las bombas de calor poseen la tecnología para producir agua para calefacción y refrigeración de forma simultánea y tanto el suelo radiante como los radiadores sirven para refrigeración pasiva, por lo que ni si quiera se utilizaría energía eléctrica por parte del compresor de la BCG. Sin embargo se debería incorporar una tercera línea de distribución.

Además, se podría incluir refrigeración pasiva no simultánea (es decir, solo operación en modo refrigeración) para los meses de verano con el diseño actual sin mayores costos en la inversión.

Sin embargo, la demanda total anual en refrigeración corresponde a aproximadamente un 8,4% de la demanda en calefacción, requiriéndose refrigeración pocas horas al año y con baja potencia, por lo que no se justifica la implementación en esta localidad e incluso podría ser suficiente que los habitantes abran las ventanas o puertas para mejorar la ventilación dentro de la vivienda y con esto disminuir la temperatura.

Con respecto al dimensionamiento de los sistemas de suelo radiante y radiadores, en ninguno de los circuitos se supera la velocidad máxima permitida de 3,5 [m/s] para sistemas de calefacción doméstica con tuberías plásticas.

Red de distribución

Tras evaluar las densidades de conexión para cada conexión se determinó que en todos los casos las densidades se encuentran por debajo del mínimo recomendado (0,7 [MWh/año m]) por lo que el sistema de calefacción no es factible a nivel económico en este aspecto. Sin embargo es posible aumentar la densidad de conexión al aumentar el suministro energético y disminuyendo la red de distribución.

Para disminuir el largo de la red de distribución se podría considerar la implementación en viviendas pareadas o departamentos en vez de viviendas aisladas, en donde además, tal como se discutió antes, permitiría reducir el consumo por vivienda.

Mientras que para aumentar el suministro energético por vivienda se puede incorporar el abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS) o calefacción de invernaderos.

Otra forma de mejorar la densidad de conexión es mediante el abastecimiento no solo de las viviendas del condominio, sino que también se podría incorporar grandes consumidores como podrían ser hospitales, municipios o similares debido a que se utilizaría menos tubería lo que permitiría reducir materiales, servicios y además disminuirían las pérdidas térmicas. Aún así, esta opción queda restringida a la distancia entre el gran consumidor y consumidores

secundarios (viviendas).

Por otro lado, con respecto a las pérdidas térmicas en la mayoría de los casos las pérdidas se mantuvieron por debajo del 10%. Sin embargo, se sobrepasó el límite en algunos casos de generación a 55 °C debido a que a mayores temperaturas también son mayores las pérdidas térmicas. Esta pérdida se pudo haber reducido disminuyendo el diámetro de la tubería (y con esto el área de intercambio de calor con el suelo), sin embargo, al hacerlo se sobrepasan las pérdidas de carga recomendadas por lo que la configuración actual es la óptima.

Todas las pérdidas de carga de la red de distribución se encuentran por debajo del máximo permitido de 100 [Pa/m], lo mismo con la velocidad del fluido.

De todas formas, las pérdidas térmicas y de carga están evaluadas para las condiciones más desfavorables: temperatura mínima del suelo y caudal máximo del fluido. Por lo que los valores promedio son menores y por lo tanto, menor el consumo energético de las bombas circulatorias y bomba de calor.

Sistemas de generación

Al evaluar las curvas de operación de las bombas de calor geotérmicas se observó que la producción de agua a temperaturas más altas tiene rendimientos menores ($COP_{55} \sim 3$) que al trabajar a temperaturas menores ($COP_{35} \sim 5$).

Esto provoca que en el caso de menor temperatura se aproveche más el suelo y por consiguiente sea menor el consumo de energía eléctrica por parte de la bomba de calor. Esto provoca que se requiera mayor longitud de sonda de intercambiador de calor o mayor caudal para el sistema abierto en el caso de 35 °C que en el caso de 55°C.

Se debe destacar además que el método IGSHPA para el dimensionamiento de intercambiadores de calor con el suelo es un método de cálculo estático en donde se utiliza la temperatura mínima del suelo no perturbada, sin embargo en la práctica los intercambiadores de calor producen una variación inmediata de la temperatura en su entorno más cercano y el flujo de calor entre el tubo y el medio van disminuyendo en el tiempo [3].

Dado que este método es estacionario no contempla esta variación de temperatura de forma directa, pero aún así este método incorpora la resistencia térmica del suelo que depende del tiempo de uso de los intercambiadores de calor, en donde a mayor tiempo de uso, mayor es la resistencia del suelo y por tanto menor su conductividad térmica. Debido a lo anterior es que se tomó la decisión de utilizar el sistema solo de día, pues disminuyendo las horas de uso anual permite al terreno recuperarse térmicamente, aumentando la temperatura en él.

Para realizar el estudio transiente se podría utilizar modelos numéricos para simular la respuesta térmica en donde se debería incorporar además el hecho de que aunque se le extrae calor al suelo, debido a la radiación solar incidente y en menor proporción al calor proveniente de la tierra, el calor perdido se irá recuperando en el tiempo.

Se destaca la relevancia de incorporar la resistencia térmica del suelo, debido a que se pudo

verificar que las resistencias térmicas conductivas de la tubería, del mortero y advectiva del fluido son prácticamente despreciables si se las compara con la resistencia del suelo. Además, en las figuras 4.19, 4.20, 4.22 se pudo observar el efecto que tiene la separación y número de intercambiadores en la resistencia térmica del suelo en un campo geotérmico, donde a menores separaciones las resistencias térmicas aumentan y por lo tanto, el largo total requerido del intercambiador de calor.

Con respecto a los distintos sistemas de captación cerrada se observó:

Sistema horizontal y slinky

- **Rendimiento:** el rendimiento del sistema en todas sus configuraciones fue de entre 7 a 8 [W/m] lo cual se encuentra por debajo de lo esperado de entre 10 a 15 [W/m] [17]
- **Superficie:** la superficie requerida por los intercambiadores horizontales y slinky es de aproximadamente 3 y 3,5 veces el área habitable respectivamente, lo cual está por sobre los 1,5 veces esperado según literatura.
- **Excavaciones:** en el sistema horizontal las excavaciones no son por trincheras sino que se debe excavar toda el área afectada lo que provoca que el movimiento de tierras sea mucho más elevado que para el sistema slinky.

Entonces, se considera que a nivel técnico los sistemas de captación cerrada horizontal son poco factibles para implementación distrital debido a que utilizan demasiada superficie comparado con la superficie habitable.

Sistema vertical cerrado U y 2U

- **Profundidad:** al aumentar la profundidad de perforación aumenta la temperatura del suelo y por lo tanto disminuye el largo requerido así como también el número de perforaciones.
- **Rendimiento:** el rendimiento del sistema en todas sus configuraciones está en el rango esperado de entre 20-70 [W/m] [17] estando los valores entre 24 y 30 [W/m] tanto para el sistema U como el 2U a profundidades de hasta 80 [m] y rendimientos de entre 29 a 33 [W/m] para sistemas con profundidades que bordean los 120 [m].
- **Superficie:** la superficie requerida por los intercambiadores verticales es de aproximadamente 0,35 y 0,22 veces la superficie habitable para el sistema U con profundidades de 80 y 120 [m] respectivamente y de 0,18 y 0,11 veces para el caso del sistema 2U con profundidades de 80 y 120 [m] respectivamente. El sistema 2U requiere de la mitad de la superficie aproximadamente que el sistema vertical U en todos los casos de estudio.

Por lo que los sistemas verticales cerrados dobles presentarían mayores ventajas técnicas. Además, pozos más profundos permiten reducir los largos requeridos, sin embargo esta variable queda limitada según características geológicas del sitio en estudio.

Sistema abierto

Con respecto al sistema por captación de aguas subterráneas, si bien parece llamativo a nivel técnico pues solo se requeriría de 1 pozo de captación y 1 de reinyección es el que presenta mayor incertidumbre debido a que no existen estudios hidrogeológicos en la zona ni información de otros pozos en Cochrane y el cálculo solo se limitó a lo esperado según caso de estudio de colegio en Coyhaique.

Además, a pesar de contar con las condiciones favorables en la zona del colegio, un estudio realizado en Coyhaique sobre la evaluación de sistemas de captación vertical geotérmica para el edificio municipal [40] se establece que la permeabilidad del suelo no es óptima para la captación de aguas subterráneas por lo que concluye que un sistema cerrado es mejor.

Aspectos económicos

Con respecto a la evaluación económica, en primer lugar se puede observar en la Figura 5.15 que a pesar de que las perforaciones a mayor profundidad tienen costos por metro más elevados, la inversión final es menor debido a que las mayores profundidades permiten reducir el largo total y número de perforaciones. De todas formas la variación económica no es significativa entre ambos casos y tal como se dijo antes, la configuración a escoger está limitada por aspectos geológicos.

Por otro lado, al comparar las inversiones requeridas junto con sus proporciones se tiene que:

- En los sistemas geotérmicos cerrados horizontal simple y vertical (U y 2U), la mayor inversión se debe a la generación siendo la más alta para el caso de perforaciones verticales simples donde la inversión en generación equivale al 43 % del total.
- El sistema slinky es el que tiene menor costo de inversión.
- Tanto en el sistema de aguas subterráneas (abierto) como en el slinky, los costos debido al sistema de calefacción en la vivienda son los más altos.

Sin embargo, según estudios del Centro de Energía [15] las proyecciones de los costos en geotermia van en descenso por lo que se esperaría que este tipo de sistemas sea más rentable en los próximos años.

Tal como se pudo observar en las curvas de inversión según número de viviendas de la figura 5.17, para todos los sistemas de generación la inversión total tiene una tendencia lineal con el número de viviendas lo que permite extrapolar los valores para identificar los costos asociados a un conjunto habitacional de distinto número que el propuesto.

Para el caso de los sistemas verticales se observó en la tabla 5.12 que el sistema abierto tiene el mayor descenso en la inversión si se compara el valor de 20 y 60 viviendas con una variación del 12,8 %, mientras que el sistema cerrado simple U es el que presenta menor variación en la inversión por vivienda con un 1,5 %. En los sistemas horizontal y slinky al

comparar entre las inversiones de 5 y 25 viviendas se obtiene una variación similar e igual a 11,8 % y 11,1 % respectivamente. En todos los casos se reducen las inversiones por vivienda a mayor número de viviendas.

Por otro lado, en el gráfico 5.18 se puede observar que para los distintos tipos sistemas de captación se observan costos operaciones similares debido a que el mayor consumo lo tiene la bomba de calor geotérmica y el resto de los sistemas de bombeo influye en menor medida, aún así el mayor costo lo tiene el sistema abierto lo cual se puede justificar con la potencia de elevación del sistema de pozo.

Además, los costos al utilizar suelo radiante o radiador (35°C) son similares (\$10.607 y \$10.845) mientras que al utilizar radiadores a mayor temperatura (55°C) los costos ascienden a \$17.668 en promedio, lo cual se justifica con que la bomba de calor geotérmica requiere de mayor potencia eléctrica a mayores temperaturas de producción.

Se pudo observar además que todos los costos operacionales son menores que los gastos en leña que se tiene actualmente en Cochrane. En específico, con los sistemas de baja temperatura (suelo radiante o radiador a 35 °C), el costo operacional es el 24-25% de lo que gastan actualmente los habitantes por vivienda. Mientras que con los radiadores a 55°C el gasto equivale al 40 % del gasto actual.

En las figuras 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se pudo observar que el costo nivelado de energía (LCOE) tiene una tendencia a disminuir a mayor número de viviendas lo cual concuerda con lo esperado debido a que uno de los beneficios de los sistemas distritales es disminuir los costos por vivienda.

Aún así, para el caso de 50 viviendas se produce una pequeña alza (o menor descenso) en todos los casos, lo cual se justifica con que para este número de viviendas ocurre el salto de incorporar 1 pasaje más a la red de distribución que implica la incorporación de mayor cantidad de tuberías, construcción y sistemas de bombeo. Entonces, se puede considerar que la forma de la red de distribución influye en los costos finales, por lo que se debería estudiar distintas distribuciones que minimicen la cantidad de tuberías.

Por otro lado, para todos los sistemas de generación se observa que este costo nivelado no varía en gran medida entre los sistemas de calefacción por suelo radiante y entre los 2 tipos de radiadores en estudio. De todas formas, los radiadores de 35°C son los que tienen el mayor LCOE.

Al comparar a nivel económico los distintos sistemas se determinó que el costo nivelado de energía menor desde el punto de vista privado lo obtiene el sistema de captación abierto con un promedio de 192 [\$/kWt], seguido del sistema slinky con un LCOE de 203 [\$/kWt] y luego el vertical cerrado doble (2U) con un LCOE promedio de 223 [\$/kWt] y el más alto corresponde a sistema de captación cerrada vertical U con 269 [\$/kWt] debido principalmente a los altos costos y gran número de perforaciones que se deben hacer a gran profundidad.

Al contrario de lo esperado según literatura, el sistema vertical doble (2U) resultó ser más rentable que el vertical simple (U). Y los sistemas de mayor profundidad resultaron ser más

rentables que los de menor profundidad.

De todos los sistemas, el vertical abierto de 40 a 50 viviendas, con suelo radiante o radiadores (55°C) tienen el menor LCOE con un valor de $182 \text{ \$/kWh}$. Sin embargo, este valor es el 244 % del costo de calefaccionar de forma distrital con caldera a base de pellet ($75 \text{ \$/kWh}$) y un 154 % si se utilizara caldera de gas ($118 \text{ \$/kWh}$)[31].

A pesar de que los sistemas con pellet tienen un menor costo, se considera que es importante tener una matriz energética diversa por lo que el hecho de que una tecnología sea más costosa que otra no debería ser un impedimento determinante para su estudio e implementación. Además, la geotermia presenta ventajas operacionales con respecto al pellet pues estos últimos requieren de mayor logística y costos operacionales, debido a que se debe gestionar el abastecimiento, distribución y almacenamiento de la materia prima.

Por otro lado, al realizar un estudio económico desde el punto de vista público se observa que se podría obtener un LCOE del 64 % del que se obtendría con inversión privada. Además, el sistema abierto tendría un LCOE equivalente al 162 % del sistema en base a pellet, y el sistema vertical cerrado doble tendría un LCOE equivalente al 185 % del sistema con pellet, por lo que sería un proyecto más factible a nivel económico.

Robustez del sistema

Con respecto a la robustez del sistema, en el límite inferior de la demanda energética de calefacción se escogió estanques de inercia para permitir tener agua caliente cuando las potencias requeridas por las viviendas sean menores que las potencias mínimas de operación de la bomba de calor.

Otro factor a tener en cuenta en sistemas de calefacción distrital es la facilidad de la ampliación de la demanda energética, ya sea por el aumento del consumo individual (ampliación de casas) como por aumentos más grandes, como la incorporación de nuevos suscriptores en el mismo sector o en el caso que se discutió sobre el abastecimiento a grandes consumidores.

Si la demanda requerida aumenta levemente por sobre la demanda de diseño debido a temperaturas extremas, el sistema sí debería ser capaz de abastecer la demanda a pesar de haber sido diseñado para una carga menor debido a:

- Si bien los sistemas de captación geotérmica están diseñados bajo ciertos parámetros, si la demanda es mayor, la bomba de calor sí podrá generar la energía dado que en todos los casos la potencia máxima de los equipos en cascada es mayor a la de diseño, sin embargo, el COP será menor lo cual significará un aumento en el gasto energético del compresor y un aumento en la tarifa eléctrica.
- Todas las bombas circuladoras son de caudal variable y pueden operar a caudales y alturas mayores que las del diseño, por lo que frente a un aumento en la demanda máxima solo deberán operar a mayor caudal (aunque tendrán mayores pérdidas).
- Para aumentar la potencia del suelo radiante se debería aumentar el caudal o el salto térmico y todos los equipos lo permiten, solo que con una baja del rendimiento.

- Los radiadores escogidos también pueden producir más energía, pero será mayor el consumo energético del equipo y además será más ruidoso.

Para el caso de la incorporación de grandes consumidores con el objetivo de mejorar la densidad de conexión se debe redimensionar todo el sistema. Se determina que no sería factible utilizar sistemas horizontales debido a que la superficie requerida es muy elevada pues el rendimiento del sistema es insuficiente. Con respecto a un sistema abierto, existen restricciones asociadas al caudal máximo explotable debido inicialmente a la disponibilidad geológica del recurso y en términos legales a que según reglamento de aguas subterráneas [6], se debe garantizar que el pozo no interfiera con derechos de aprovechamiento de aguas de terceros.

Por lo que para incorporar a grandes consumidores se recomendaría utilizar sistemas verticales cerrados dobles que son los que presentan mayores ventajas a nivel técnico-económico. Los sistemas verticales cerrados simples no se recomendarían debido a que la mayor cantidad de pozos provocan los mayores costos de inversión.

Capítulo 7

Conclusiones

En primer lugar se concluye que los objetivos del estudio se cumplieron, debido a que fue posible estudiar y dimensionar un sistema de calefacción distrital con geotermia en distintos tipos de sistemas de captación, tecnologías de calefacción a vivienda y distintos números de viviendas.

Además, se estableció la metodología general de cada parte del sistema, incluyendo los fundamentos teóricos así como las ecuaciones requeridas para el dimensionamiento en todas las configuraciones en estudio. Por lo que el estudio puede servir como una futura guía para la evaluación de otras localidades.

A nivel técnico-económico, en Cochrane la calefacción distrital con geotermia no es viable desde el punto de vista de una inversión privada debido a que los costos de inversión son muy altos y el sistema se vuelve poco rentable, sin embargo, sería posible desde el punto de vista público-económico. Se podría mejorar la factibilidad incluyendo una evaluación social para considerar además el costo de las externalidades que se estarían evitando.

A nivel medioambiental, se puede incluir el impacto de este tipo de tecnologías en las emisiones que se estarían evitando mediante el valor del material particulado MP2,5. También se podría agregar valor, al destinar este proyecto a viviendas sociales energéticamente eficientes y se podría optar a financiamiento por parte del estado con fondos nacionales de desarrollo regional (FNDR).

Por otro lado, se determinó que si bien no es la mejor opción a nivel económico, el sistema de captación vertical cerrado con sondas en 2U presenta las mejores condiciones a nivel técnico-económico debido a que el sistema abierto presenta alta incertidumbre y el sistema slinky tiene un rendimiento insuficiente que provoca altos requerimientos de superficie.

Además, actualmente los sistemas de suelo radiante como los radiadores de baja temperatura tienen costos similares, por lo que el suelo radiante es una mejor opción debido a que entrega mayor confort térmico.

Se pudo comprobar además que al abastecer de forma distrital es posible disminuir los costos energéticos y que con todos los casos de estudio se logra reducir los costos operaciones

con respecto al sistema actual de calefacción por leña. Además, de entre las temperaturas de producción, es recomendable trabajar a menores temperaturas para disminuir los costos operaciones junto con las pérdidas térmicas.

A modo de conclusión, aunque este tipo de proyecto no es rentable aún, si el objetivo es mejorar la calidad de vida de los habitantes mejorando el confort térmico, se debe seguir trabajando en esta línea. Pues los sistemas de calefacción distrital utilizando geotermia son los sistemas más eficientes para generar confort térmico con el mínimo impacto ambiental y para lo cual es necesario desarrollar más políticas públicas que fomenten este tipo de energías renovables.

Trabajo futuro

Tal como se discutió en la sección de análisis de resultados, dado que el sistema no es factible a nivel económico se podría estudiar en el futuro este tipo de sistemas considerando las siguientes opciones:

- Ampliar el sistema a abastecimiento de agua caliente sanitaria y/o calefacción de invernaderos.
- Construcción de viviendas con bajo consumo energético (estándar passivhaus).
- Ampliar el sistema a refrigeración si la demanda de la zona en estudio justifica la inversión
- Aumentar la densidad de conexión con viviendas pareadas o departamentos.
- Abastecer a consumidores con grandes demandas de energía como hospitales, municipios, entre otros y que las viviendas del condominio sean clientes secundarios.

Bibliografía

- [1] UNE 100-155-88. Climatización: Cálculo de vasos de expansión. *Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)*, 1988.
- [2] Anwo. Catálogo general y lista de precios, 2020-2021.
- [3] Alonso Zenteno Arenas. *Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile, 2013.
- [4] Alejandra Vargas Cáceres. *Análisis técnico-económico de un sistema de calefacción geotérmico-solar para una vivienda en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Mecánica., Universidad de Chile, 2018.
- [5] Rodrigo Maripanguí Karin García Diego Aravena Linda Daniele. Assessment of geothermal heat pump heating systems in coyhaique city, chilean patagonia. *Research-Gate*, 2016.
- [6] Dirección General de Aguas. Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, 2014.
- [7] Centro Nacional de Análisis de calidad de Aire MMA. Información sobre monitoreo al sistema de mantención de información nacional de calidad del aire para mp2,5 y mp10 de la comuna de cochrane, 2019.
- [8] Gobierno de Chile. *Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social*. 2009.
- [9] Gobierno de Chile. Censo, 2017.
- [10] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). *Guía técnica: Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. IDAE, Madrid, 2012.
- [11] Ilustre Municipalidad de Cochrane. Plano de vivienda - los colonos n°199, 2020.
- [12] Ministerio de Energía. Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial, 2010.
- [13] Ministerio de Energía. Política energética aysén 2018, 2018.
- [14] Ministerio de Energía. Índice de precios - bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile, 2019.
- [15] Centro de Energía FCFM CEGA. Análisis de opciones de energías renovables aplicadas a calefacción residencial y potencial geotérmico en la región de aysén, 2017.
- [16] Asociación de Fabricantes de Generadores y Emisores de Calor por Agua Caliente. *Guía sobre las claves para la optimización de las instalaciones de calefacción individuales*.

- Eficiencia energética y máximo confort en radiadores.* Madrid, 2014.
- [17] Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. *Guía de la Energía Geotérmica.* Madrid ahorra con energía, 2008.
- [18] Asociación Española de Normalización. Une 149201: Dimensionamiento de agua para consumo humano dentro de los edificios, 2017.
- [19] Instituto Nacional de Normalización INN. *Nch853: Acondicionamiento térmico - Envoltante térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.* 2007.
- [20] Instituto Nacional de Normalización INN. *Nch3308: Ventilación - Calidad aceptable de aire interior - Requisitos.* 2013.
- [21] Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización. *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios en Chile.*, División Técnica de Aire Acondicionado y Refrigeración, 2007.
- [22] Agencia de Sostenibilidad Energética. *Manual de Desarrollo de proyectos. Energía Distrital.* Gobierno de Chile, 2018.
- [23] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo II Energía.* 2018.
- [24] Ministerio de vivienda y urbanismo. Observatorio urbano, 2020. URL <https://www.observatoriorurbano.cl/>.
- [25] Hans-Jrg G. Diersch. *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media.* Springer, 2014.
- [26] ECOFOREST. Ficha técnica bombas de calor, 2020.
- [27] EEChile. Condominio frankfurt: primera central distrital geotérmica funcionando en Chile, . URL <https://www.eechile.cl/video-condominio-frankfurt-primera-central-distrital-geotermica-funcionando-chile/>.
- [28] EEChile. Passivhaus, . URL <https://www.eechile.cl/passivhaus/>.
- [29] Enativa. Infografía bombas de calor, 2017. URL <http://www.enativa.cl/wp-content/uploads/2018/05/Info-Enativa-2017.pdf>.
- [30] Certificación energética. Tablas del etilenglicol y propilenglicol. URL <https://certificacionenergetica.info/ist/pdf/Tablas-del-Etilenglicol-y-Propilenglicol.pdf>.
- [31] Fundación energía para todos. *Evaluación de un proyecto de calefacción distrital para la ciudad de Cochrane.* Ministerio del medioambiente, 2020.
- [32] Fernanda Paulina Ochoa Espinoza. *Análisis de la variación de temperatura en pozo geotérmico para la obtención de una correlación con resistencias térmicas involucradas.* Habilitación profesional presentada al departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísica, 2019.
- [33] FERROPLAST. Tarifa sistema de geotermia ferroterm.
- [34] International Organization for Standardization. *ISO 6946: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods.* 2007.
- [35] grupopuma. Morcem geogROUT. mortero técnico para geotermia.

- [36] International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA). Layout, fabrication, and installation of slinky ground heat exchangers. *Oklahoma State University*.
- [37] M. A. M Bohórquez y S. G. Melgar J. M. A Márquez. Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. application to very low enthalpy geothermal energy systems, 2016.
- [38] JAGA. Ficha técnica radiadores strada hybrid, 2020.
- [39] Seminario Castelblanco José Ignacio. *Evaluación técnico-económica de calefacción distrital en Punta Arenas*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico e Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile, 2012.
- [40] Muñoz Morales Mauricio Ernesto. *Bomba de calor geotérmica con intercambiadores de calor verticales cerrados en Coyhaique*. Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias mención Geología, 2018.
- [41] ASHRAE: American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers. *District heating guide*. 2013.
- [42] Bruno Adrián Ortega Leiva. *Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile*. 2017.
- [43] Pirobloc. Cálculo de pérdidas de carga, 2019. URL <https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>.
- [44] Gonzalo Daniel Pizarro Poblete. *Memoria de cálculo en sistema de calefacción por geotermia*. Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica de procesos y mantenimiento industrial. Universidad Técnica Federico Santa María, 2019.
- [45] PROVALTEC. Tipos de válvulas. URL <https://www.provaltec.cl/preg-frecuentes/tipos-de-valvulas>.
- [46] Oscar Reckmann. *Pozos Profundos: Programa de Riego en el Secano Interior y Costero*. Gobierno de Chile. Ministerio de agricultura, 2000.
- [47] REITEMAN. Tipos de tuberías para calefacción: ¿cuál es mejor? URL <https://www.reiteman.com/tipos-de-tuberias-para-calefaccion-cual-es-mejor/>.
- [48] RUCANTU. Condominio frankfurt i- temuco. URL <https://www.rucantu.cl/frankfurt>.
- [49] CYPE Ingenieros SA. Generador de precios chile. URL http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Movimientos_de_tierra/AD_Movimiento_de_tierras_en_edifi/Excavaciones/Excavacion_de_zanjas_y_pozos.html.
- [50] Marco Antonio Seisdedos Sáez. *Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea, aspectos a considerar en el contexto local*. Tesis para optar al título de geólogo, 2012.
- [51] SGCG. Transferencia de calor por radiacion: emisividad, absorbitividad y reflectividad, 2014. URL <https://sgcg.es/articulos/2014/08/29/transferencia-de-calor-por-radiacion-5-emisividad-absorbitividad-y-reflectividad/>.
- [52] Mauro Sebastián Vielma Sossa. *Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial*. Memoria para optar al título

de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 2018.

- [53] Ernst Basler + Partner Chile SpA. *Estudio de Ingeniería de Detalle para Proyecto de Calefacción Distrital en el Sector Escuela Agrícola de Coyhaique. Ingeniería Conceptual, Básica y de Detalle*. Ministerio del Medio Ambiente – Secretaría del Medio Ambiente.
- [54] Canal sur Patagonia. Tarifa eléctrica rebajada para calefacción en coyhaique y puerto aysén, 2020. URL <https://www.canalsurpatagonia.cl/tarifa-electrica-rebajada-para-calefaccion-en-coyhaique-y-puerto-aysen/>.
- [55] UPONOR. *Manual técnico de climatización invisible residencial*.
- [56] UPONOR. *Manual técnico geotermia*. 2013.
- [57] UPONOR. *Tarifa 2020 - Tuberías preaisladas Ecoflex*. 2020.
- [58] Arquitectura y energía. Temperatura de confort en vivienda. URL <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/#:~:text=La%20temperatura%20del%20aire%20basta,25%C2%B0C%20en%20verano.>
- [59] D. Marcotte y P. Pasquier. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Département des génies civil, géologique et des mines. École Polytechnique de Montréal*, 2008.

Anexo A

Hojas de cálculo

Tabla A.1: Pérdidas térmicas en red de distribución - 35 °C

Viviendas	Pérdidas térmicas																	
	5				10				15				20					
	Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa			
Tipo red	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R		
Largo red [m]	34	34	46	46	73	73	85	85	101	101	136	136	176	176	170	170		
Volumen agua en red [l]	85				354				502				830					
Nº tramos	1		5		1		10		1		15		2		20		20	
Diámetro interno [m]	0,032		0,0204		0,051		0,0204		0,051		0,0204		0,051		0,0204		0,0204	
Diámetro externo [m]	0,175		0,14		0,175		0,14		0,175		0,14		0,175		0,14			
U_tubería aislada	0,173		0,148		0,249		0,148		0,249		0,148		0,249		0,148		0,148	
R_tubería [mK/W]	5,78		6,76		4,02		6,76		4,02		6,76		4,02		6,76		6,76	
Ancho trinchera	0,95		0,88		0,95		0,88		0,95		0,9		0,95		0,9			
Excavación [m3]	29,07				62,4				86,4				150,5					
Separación 1-2 [m]	0,375		0,34		0,375		0,34		0,375		0,34		0,375		0,34			
P - factor geométrico [mK/W]	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56		
R_efectiva [mK/W]	6,22	6,46	7,21	7,45	4,44	4,71	7,21	7,45	4,44	4,71	7,21	7,45	4,44	4,71	7,21	7,45		
q [W/m]	4,80	3,85	4,14	3,34	6,72	5,28	4,14	3,34	6,72	5,28	4,14	3,34	6,72	5,28	4,14	3,34		
Q_total [W]	163	131	191	153	490	385	352	284	679	533	563	454	1183	929	704	567		
Q_total [W]	638				1511				2229				3383					
%Pérdidas térmicas máximas	5,9%				7,0%				6,8%				7,7%					
T_out ida [°C]	34,92				34,89				34,90				34,87					
T_in retorno [°C]	29,92				29,89				29,90				29,89					

Tabla A.2: Pérdidas térmicas en red de distribución - 35°C

Viviendas	Pérdidas térmicas											
	3				40				50			
	Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa	
Tipo red	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R
Largo red [m]	219,5	219,5	255	255	305	305	360	360	429	429	422	422
Volumen agua en red [l]	1063				2041				2029			
Nº tramos	2		30		2		48		3		48	
Diámetro interno [m]	0,051		0,0204		0,0614		0,0204		0,051		0,0204	
Diámetro externo [m]	0,175		0,14		0,2		0,14		0,175		0,14	
R_tubería aislada	0,249		0,148		0,257		0,148		0,249		0,148	
R_tubería [mK/W]	4,02		6,76		3,89		6,76		4,02		6,76	
Ancho trinchera	0,95		0,88		1,15		0,88		1,10		0,88	
Excavación [m3]	187,67				315,68				424,7			
Separación 1-2 [m]	0,375		0,34		0,45		0,34		0,45		0,34	
P - factor geométrico [mK/W]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,52	0,52	0,56	0,56	0,52	0,52	0,55	0,56
R_efectiva [mK/W]	4,44	4,71	6,22	6,46	4,30	4,55	7,21	7,45	4,42	4,67	6,2	7,45
q [W/m]	6,72	5,28	4,80	3,85	6,95	5,47	4,14	3,34	6,75	5,33	4,8	3,34
Q_total [W]	1475	1159	1225	981	2120	1668	1491	1201	2897	2284	2027	1408
Q_total [W]	4840				6481				8616			
%Pérdidas térmicas máximas	7,4%				7,4%				7,9%			
T_out ida [°C]	34,89				34,88				34,87			
T_in retorno [°C]	29,89				29,88				29,87			

Tabla A.3: Pérdidas térmicas en red de distribución - 55°C

Viviendas	Pérdidas térmicas															
	5				10				15				20			
	Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa	
Tipo red	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R
Largo red [m]	34	34	46	46	73	73	85	85	101	101	136	136	176	176	170	170
Volumen agua en red [l]	85				173				353				394			
Nº tramos	1		5		1		10		1		15		2		20	
Diámetro interno [m]	0,032		0,0204		0,032		0,0204		0,0408		0,0204		0,032		0,0204	
Diámetro externo [m]	0,175		0,14		0,175		0,14		0,175		0,14		0,175		0,14	
U_tubería aislada	0,173		0,148		0,173		0,148		0,203		0,148		0,173		0,148	
R_tubería [mK/W]	5,78		6,76		5,78		6,76		4,93		6,76		5,78		6,76	
Ancho trinchera	0,95		0,88		1,0		0,88		0,95		0,9		0,95		0,88	
Excavación [m3]	29,07				62,4				86,4				150,5			
Separación 1-2 [m]	0,375		0,34		0,375		0,34		0,375		0,34		0,375		0,34	
P - factor geométrico [mK/W]	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56
R_efectiva [mK/W]	6,20	6,50	7,19	7,49	6,20	6,50	7,19	7,49	5,34	5,65	7,19	7,49	6,20	6,50	7,19	7,49
q [W/m]	8,05	6,14	6,94	5,32	8,05	6,14	6,94	5,32	9,34	7,06	6,94	5,32	8,05	6,14	6,94	5,32
Q_total [W]	274	209	319	245	587	448	590	452	943	713	944	724	1416	1080	1179	905
Q_total [W]	1046				2078				3324				4581			
%Pérdidas térmicas máximas	9,4 %				9,3 %				9,9 %				10,2 %			
T_out ida [°C]	54,76				54,74				54,72				54,69			
T_in retorno [°C]	44,76				44,74				44,72				44,70			

Tabla A.4: Pérdidas térmicas en red de distribución - 55°C

Pérdidas térmicas												
Viviendas	30				40				50			
	Principal		Casa		Principal		Casa		Principal		Casa	
Tipo red	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R	I	R
Largo red [m]	219,5	219,5	255	255	305	305	360	360	429	429	422	422
Volumen agua en red [l]	741				1481				1398			
N° tramos	2		30		2		40		3		50	
Diámetro interno [m]	0,0408		0,0204		0,051		0,0204		0,0408		0,0204	
Diámetro externo [m]	0,175		0,14		0,175		0,14		0,175		0,14	
U_tubería aislada	0,203		0,148		0,249		0,148		0,203		0,148	
R_tubería [mK/W]	4,93		6,76		4,02		6,76		4,93		6,76	
Ancho trinchera	0,95		0,88		0,95		0,88		1,0		0,88	
Excavación [m3]	187,67				260,78				366,8			
Separación 1-2 [m]	0,375		0,34		0,45		0,34		0,45		0,34	
P - factor geométrico [mK/W]	0,55	0,55	0,55	0,55	0,52	0,52	0,56	0,56	0,52	0,52	0,55	0,56
R_efectiva [mK/W]	5,34	5,65	6,20	6,50	4,40	4,70	7,19	7,49	5,32	5,61	6,20	7,49
q [W/m]	9,34	7,06	8,05	6,14	11,33	8,47	6,94	5,32	9,38	7,11	8,05	5,32
Q_total [W]	2050	1549	2052	1565	3456	2584	2498	1916	4024	3051	3396	2246
Q_total [W]	7216				10454				12717			
%Pérdidas térmicas máximas	10,6 %				11,5 %				11,2 %			
T_out ida [°C]	54,70				54,62				54,65			
T_in retorno [°C]	44,70				44,62				44,65			

Anexo B

Curvas de operación Bombas de calor

B.1. COP

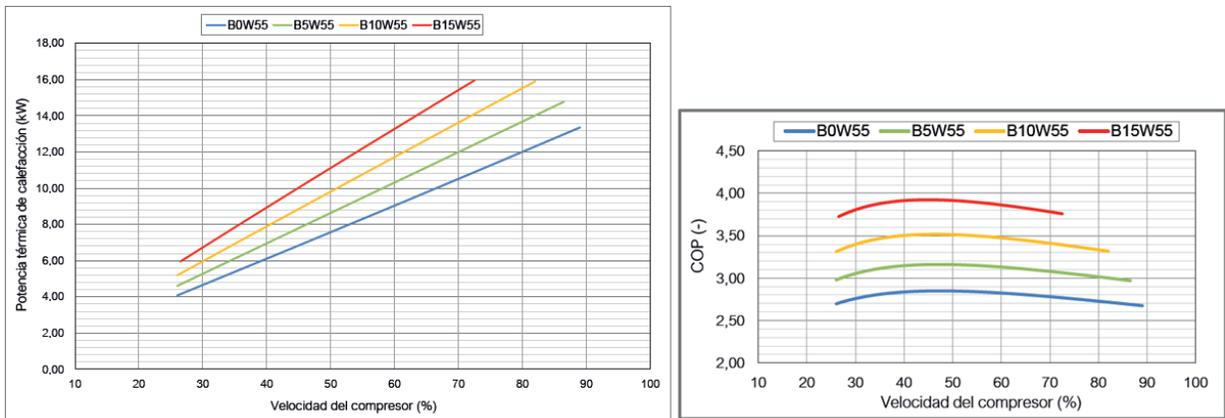


Figura B.1: COP BCG 3-13 kW

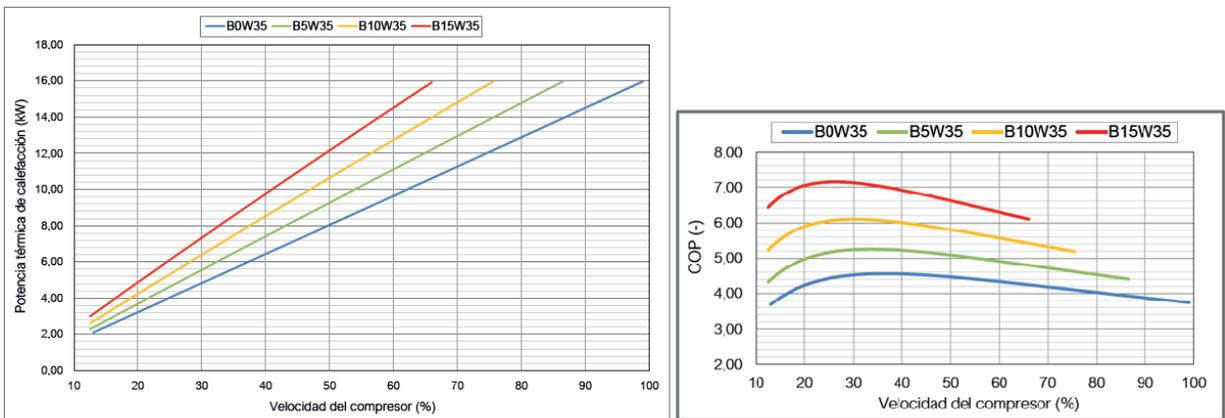


Figura B.2: COP BCG 3-13 kW

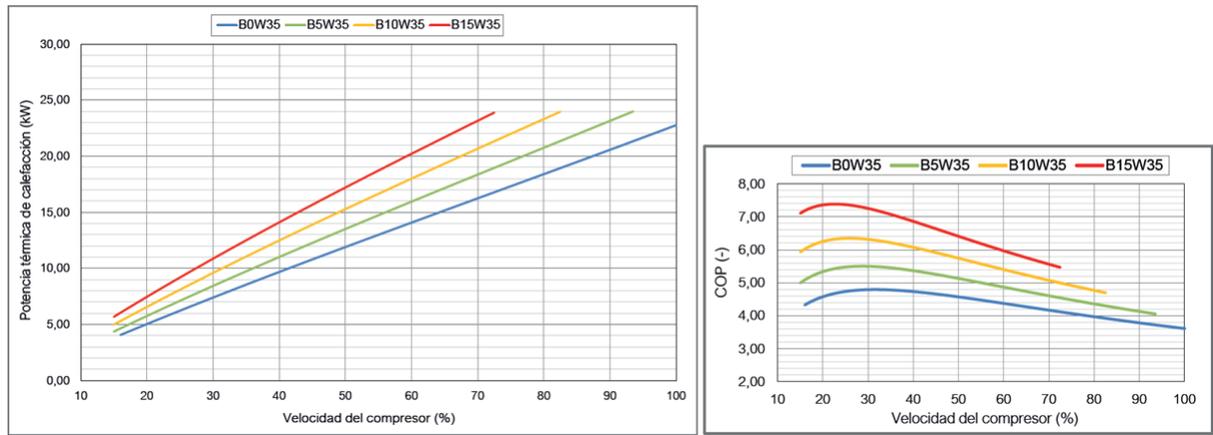


Figura B.3: COP BCG 5-22

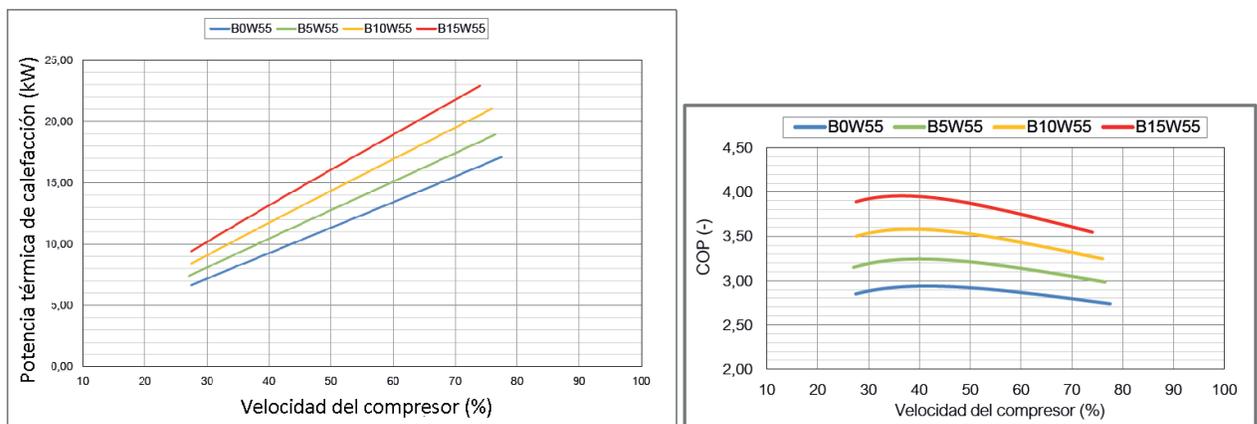


Figura B.4: COP BCG 5-22

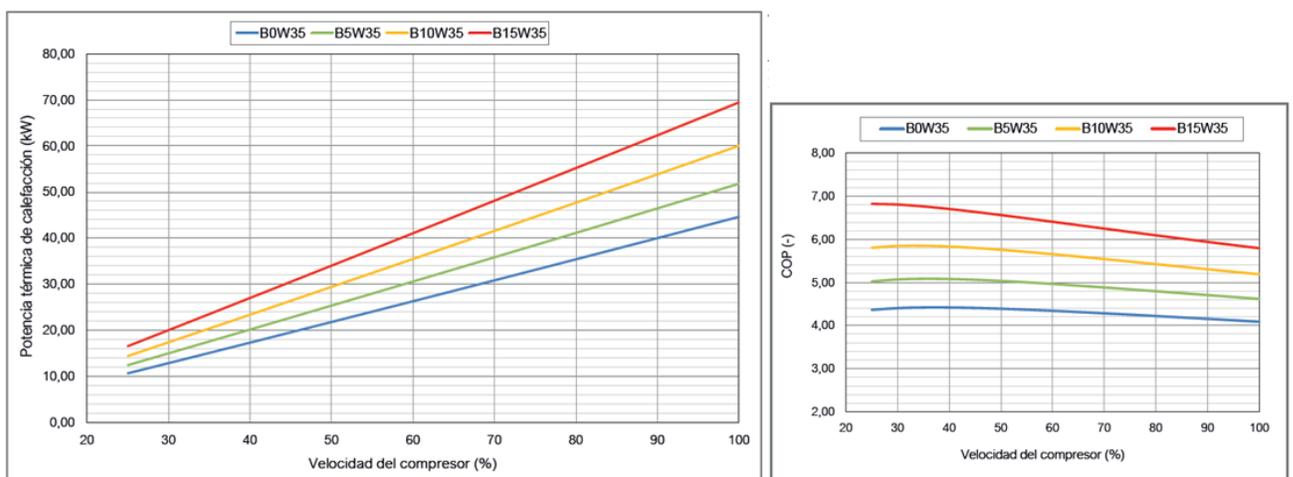


Figura B.5: COP BCG 12-40

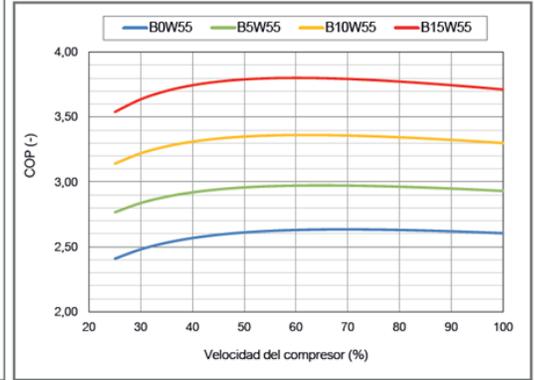
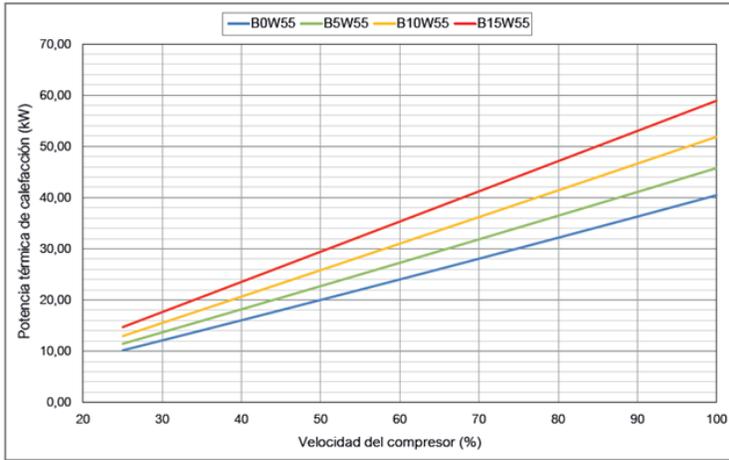


Figura B.6: COP BCG 12-40

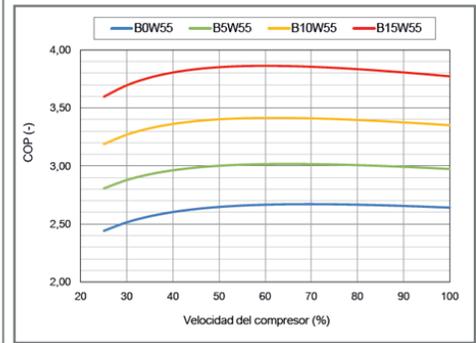
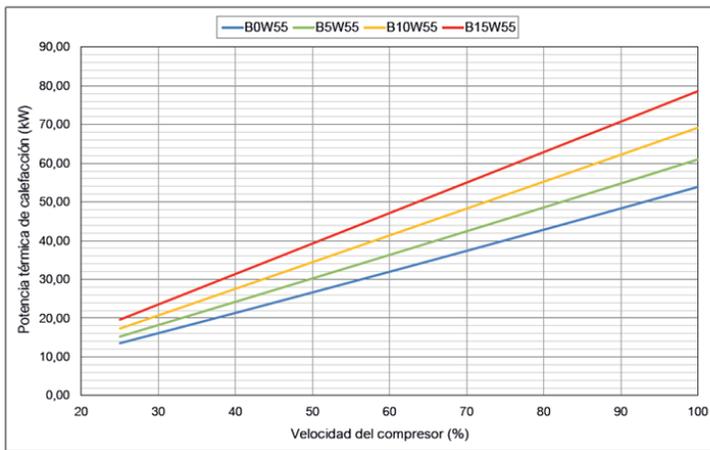


Figura B.7: COP BCG 15-70

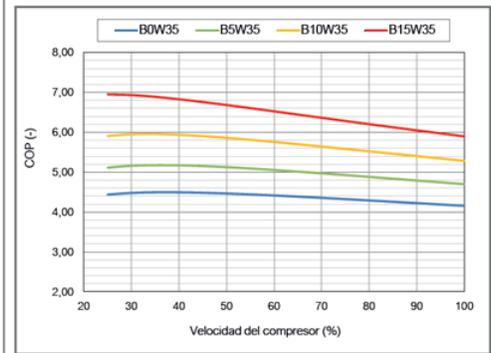
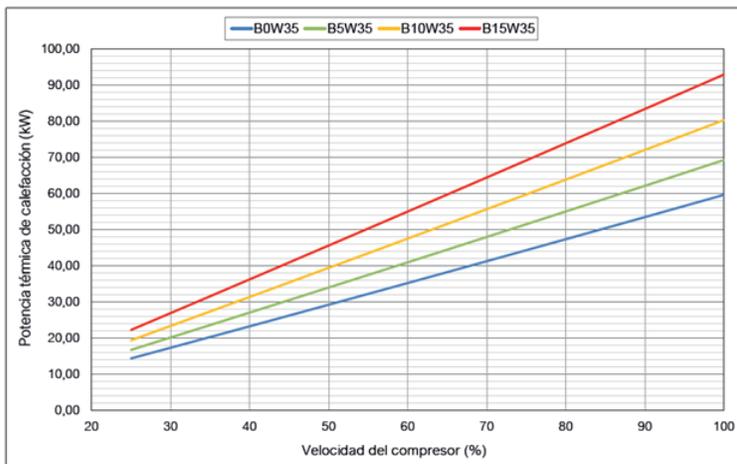


Figura B.8: COP BCG 15-70

B.2. Pérdidas de carga

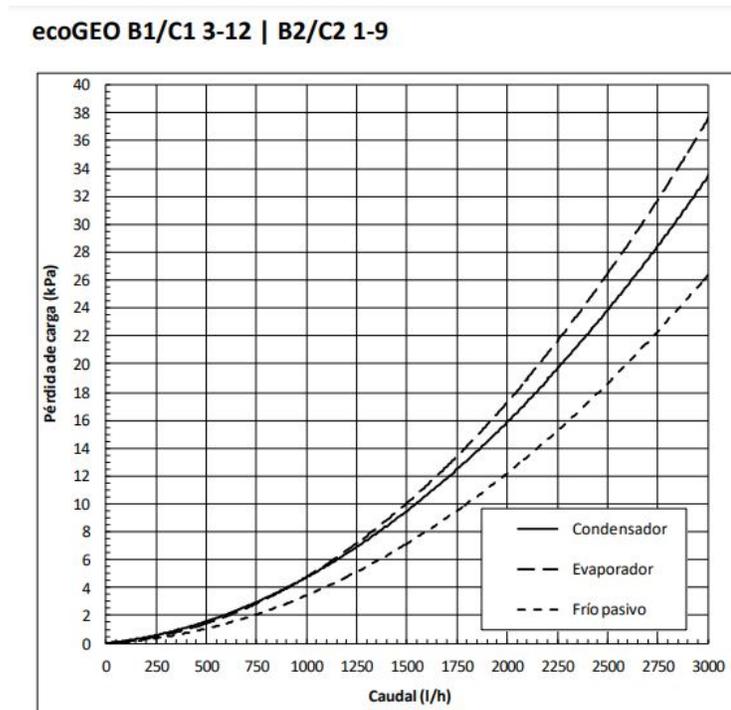


Figura B.9: Pérdidas de carga en bomba de calor 3-12 kW

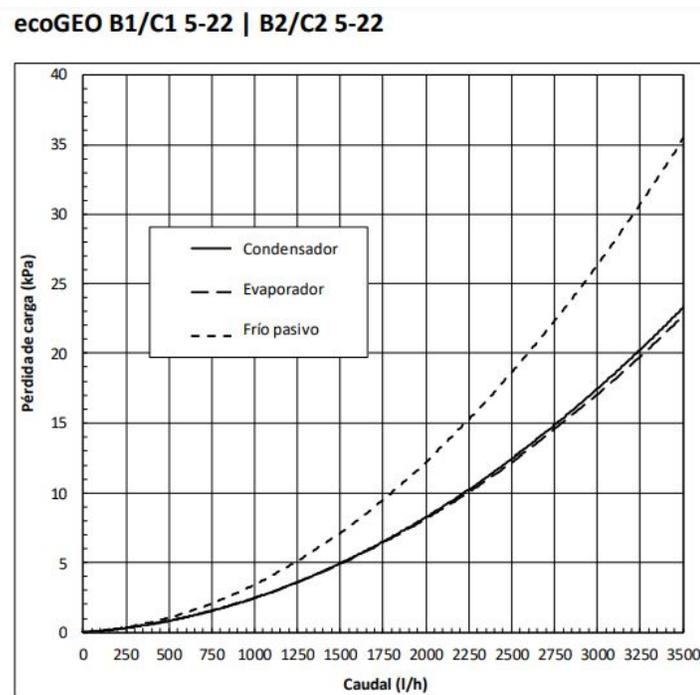


Figura B.10: Pérdidas de carga en bomba de calor 5-22 kW

ecoGEO HP1 12-40 kW

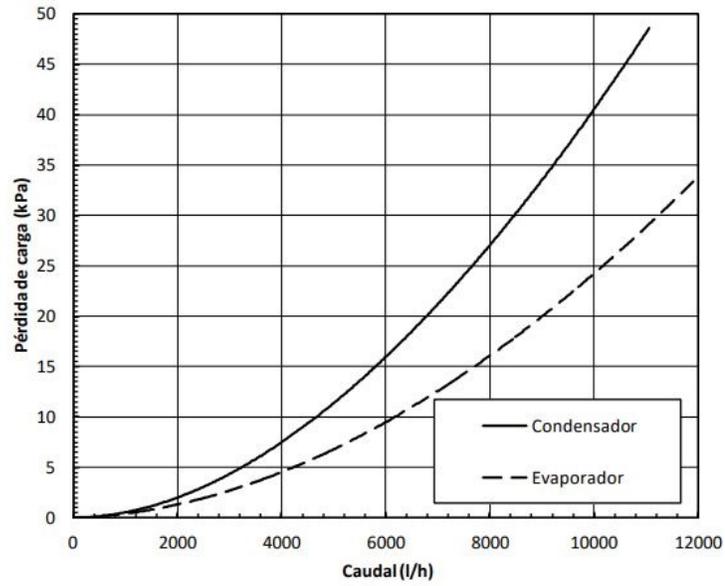


Figura B.11: Pérdidas de carga en bomba de calor 12-40 kW

ecoGEO HP1 15-70 kW

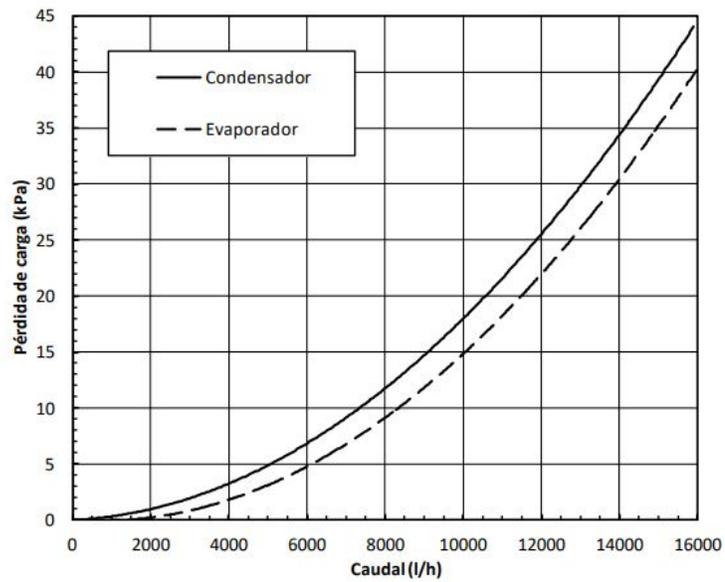


Figura B.12: Pérdidas de carga en bomba de calor 15-70 kW

Anexo C

Propiedades del fluido caloportador

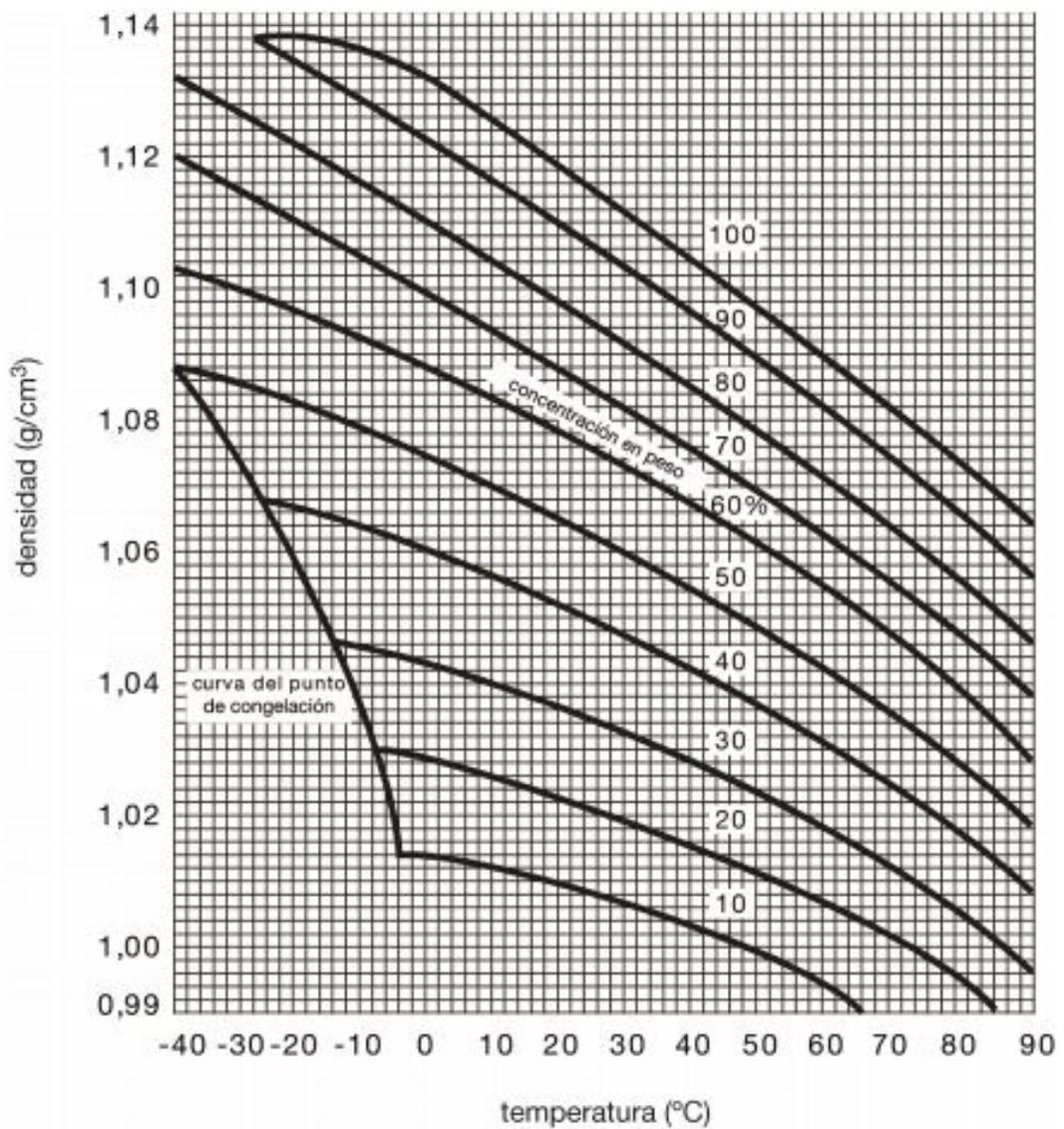


Figura C.1: Densidad de mezcla de agua con etilenglicol [30]

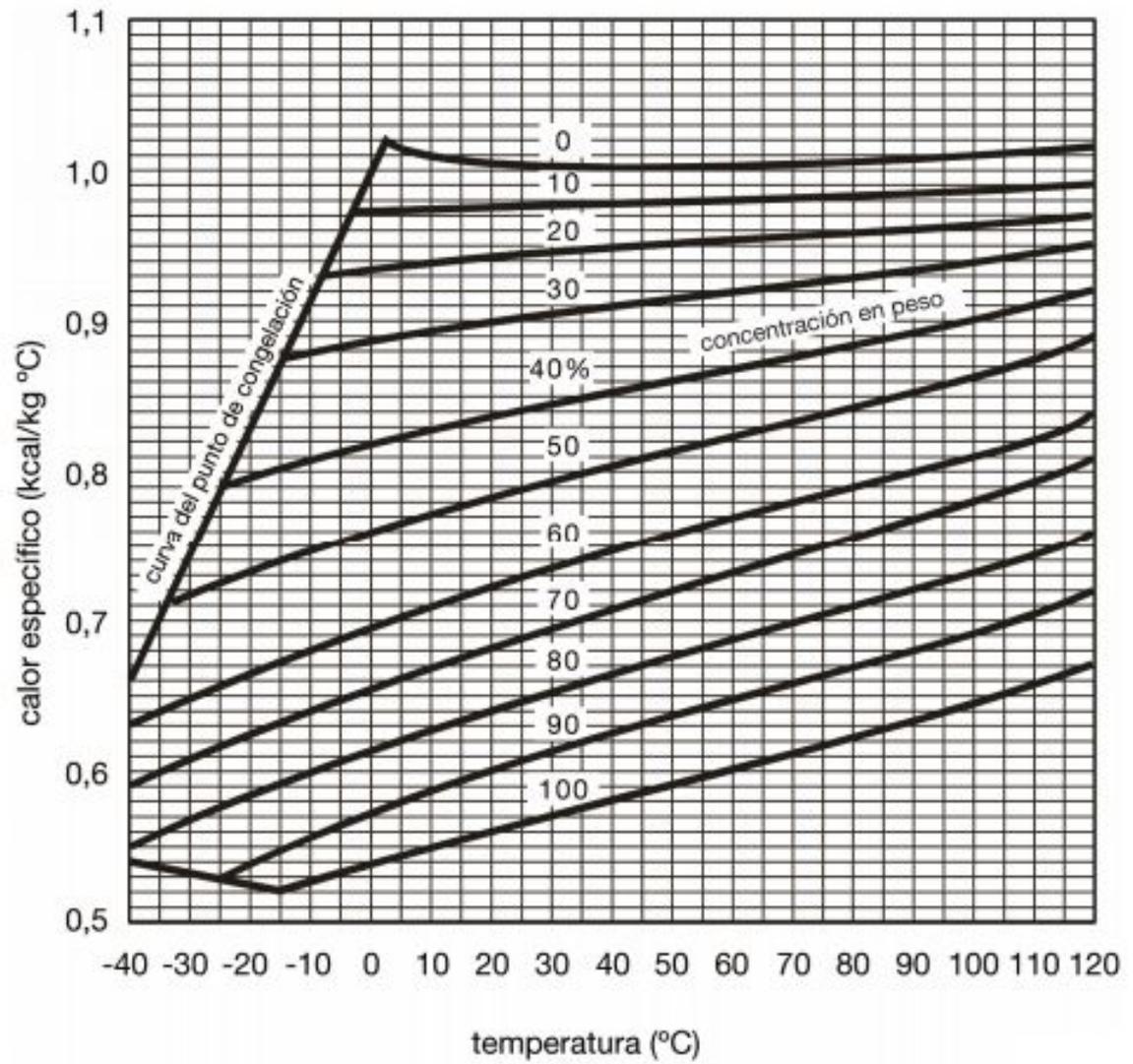


Figura C.2: Calor específico de mezcla de agua con etilenglicol [30]

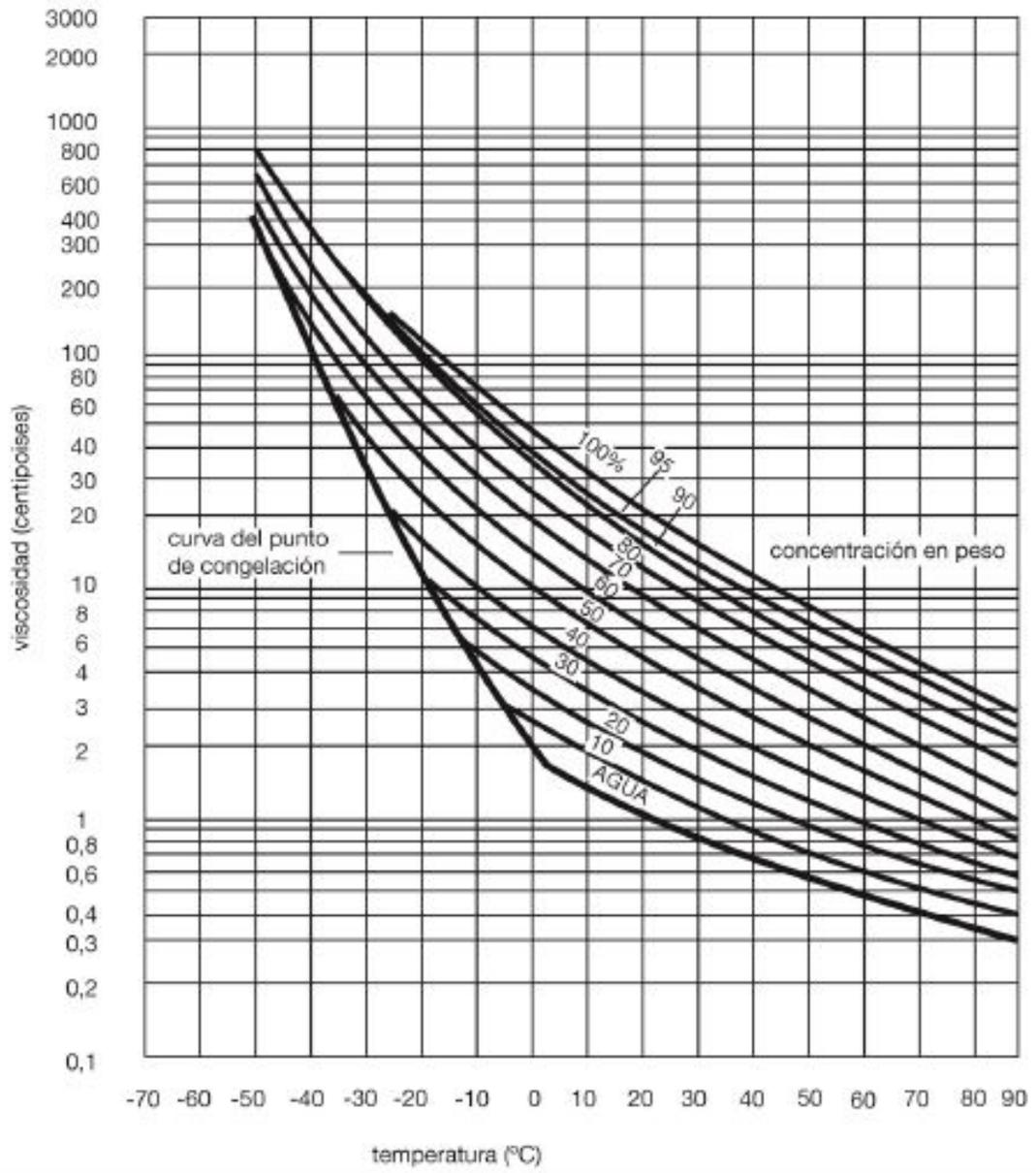


Figura C.3: Viscosidad de mezcla de agua con etilenglicol [30]

Anexo D

Cotizaciones y fichas técnicas

D.1. Radiadores

EMISIONES STRADA HYBRID

ALTURA 035

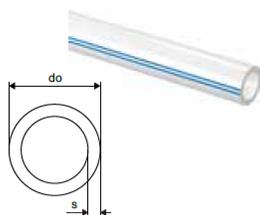
DIMENSIONES			POSICIÓN	CALEFACCIÓN <i>Temperatura ambiente 20°C</i>				REFRIGERACIÓN <i>Temperatura ambiente 27°C</i>	NIVEL DE PRESIÓN SONORA <i>dB(A)</i>	CONSUMO DE ENERGÍA ELECTRICA <i>W</i>	PRECIO Color estándar <i>€</i>	PRECIO Otros colores <i>€</i>	CÓDIGO PEDIDO
H <i>cm</i>	L <i>cm</i>	B <i>cm</i>		75/65 <i>Wattios</i>	55/45 <i>Wattios</i>	45/35 <i>Wattios</i>	35/30 <i>Wattios</i>	16/18 <i>Wattios</i>					
035	060	11	1	1142	647	409	246	191	26.0	4.8	558,00	629,00	STRW.035 060 11 /133 /ACO
			2	1223	693	438	263	205	30.0	5.4			
			3	1447	819	518	311	242	40.0	6.8			
035	060	16	1	1400	793	501	301	214	26.0	4.8	617,00	693,00	STRW.035 060 16 /133 /ACO
			2	1503	851	538	323	230	30.0	5.5			
			3	1989	1126	712	428	305	41.1	7.2			
035	080	11	1	1648	933	589	355	276	26.0	6.3	632,00	710,00	STRW.035 080 11 /133 /ACO
			2	1770	1002	633	381	296	30.0	6.8			
			3	2136	1210	764	460	358	41.8	9.1			
035	080	16	1	2040	1156	730	439	312	26.0	6.0	713,00	800,00	STRW.035 080 16 /133 /ACO
			2	2188	1239	783	471	335	30.0	6.7			
			3	2936	1663	1050	632	450	42.4	9.0			
035	100	11	1	2136	1210	764	460	358	26.0	7.8	746,00	833,00	STRW.035 100 11 /133 /ACO
			2	2301	1303	823	495	385	30.0	8.7			
			3	2825	1600	1011	608	473	43.0	12.2			
035	100	16	1	2630	1490	941	566	403	26.0	7.0	857,00	954,00	STRW.035 100 16 /133 /ACO
			2	2817	1595	1008	606	431	30.0	7.7			
			3	3883	2199	1389	836	595	44.1	10.7			
035	120	11	1	2612	1479	935	562	437	26.0	8.9	820,00	921,00	STRW.035 120 11 /133 /ACO
			2	2822	1598	1010	607	473	30.0	9.9			
			3	3514	1990	1257	756	589	44.0	14.8			
035	120	16	1	3242	1836	1160	698	496	26.0	8.7	946,00	1058,00	STRW.035 120 16 /133 /ACO
			2	3472	1966	1242	747	532	30.0	9.8			
			3	4830	2735	1728	1039	740	44.8	14.3			
035	140	11	1	3077	1743	1101	662	515	26.0	10.1	892,00	999,00	STRW.035 140 11 /133 /ACO
			2	3333	1887	1192	717	558	30.0	11.2			
			3	4203	2380	1504	904	704	44.8	17.5			
035	140	16	1	3844	2177	1376	827	589	26.0	9.6	1033,00	1151,00	STRW.035 140 16 /133 /ACO
			2	4117	2332	1473	886	630	30.0	10.5			
			3	5777	3272	2067	1243	885	45.4	14.4			

Figura D.1: Ficha técnica radiadores JAGA - Altura 035 [38]

D.2. Suelo radiante

Uponor Comfort Pipe PLUS

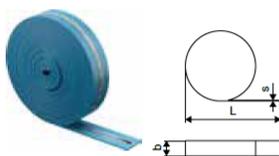
- 6 bar a 70 °C



Código Uponor	Dimensión	L m	do mm	s mm	p bar	V l/m	color	Uds. uPointsPalet	Uds. Caja	PVP/m. ud
1062045	16x2,0 240m	240	16	2	6	0,113	blanco	700	1440	2,21 €
1062046	16x2,0 640m	640	16	2	6	0,113	blanco	2600	1280	2,18 €

Uponor Multi Autofijación zócalo perimetral

- Zócalo perimetral, conforme a DIN 18560.
- Fabricado en polietileno.
- Con tiras adhesivas en la cara exterior y faldón que proporciona un sellado hermético acorde a UNE-EN 1264.



Código Uponor	Dimensión	color	Uds. Caja	PVP/m. ud
1000080	PE 50m 150x10mm	azul	200	MTR 2,36 €

Uponor Nubos PLUS panel IB

- EPS gris (libre de HBCD) con aditivos de grafito y baja conductividad térmica.
- Con aislamiento acústico por impacto y aéreo.



Código Uponor	Dimensión	ND	I	R-valor	w	h	A	Área	Uds. uPointsPalet	Uds. Caja	PVP/m. ud
1084026	1450X850X19	19	1450	0,75	850	42	1,12	1,23	100	92,25	18,45 m ² 24,10 €
1084027	1450X850X34	34	1450	1,25	850	57	1,12	1,23	100	61,5	12,3 m ² 30,75 €

Uponor Multi film PE

- Lámina de PE para la instalación bajo el aislamiento térmico existente.
- Transparente.



Código Uponor	Dimensión	L m	s mm	b mm	color	Uds. Caja	PVP/m. ud
1038296	0,2mm 200x1m	200	0,2	1000	azul	200	PCE 1,28 €

Uponor Vario M colector con caudalímetro



Código Uponor	Dimensión	salidas	p	I	Uds. Caja	PVP/m. ud
1085944	2X G3/4 Euro	2	6	210	1	PCE 227,84 €
1085945	3X G3/4 Euro	3	6	260	1	PCE 256,39 €
1085946	4X G3/4 Euro	4	6	310	1	PCE 308,71 €
1085947	5X G3/4 Euro	5	6	360	1	PCE 361,04 €
1085948	6X G3/4 Euro	6	6	410	1	PCE 413,36 €
1085949	7X G3/4 Euro	7	6	460	1	PCE 465,68 €
1085950	8X G3/4 Euro	8	6	510	1	PCE 518,01 €
1085951	9X G3/4 Euro	9	6	560	1	PCE 570,33 €
1085952	10X G3/4 Euro	10	6	610	1	PCE 622,66 €
1086250	11X G3/4 Euro	11	6	660	1	PCE 674,98 €
1086251	12X G3/4 Euro	12	6	710	1	PCE 727,30 €

Figura D.2: [38]

D.3. Bombas circuladoras

Hidráulica

Bombas Circuladoras de Calefacción GRUNDFOS



Alpha 3 Grundfos

Descripción del Producto

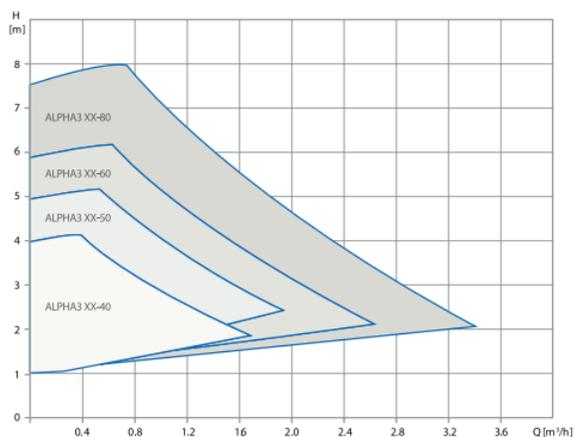
La nueva circuladora alpha3 redefine lo que una pequeña circuladora doméstica es capaz hacer. Las capacidades de comunicación incorporadas de serie en la nueva alpha3 se traducen en un fácil y rápido equilibrado hidráulico de sistemas de los radiadores de una vivienda. Esta nueva función beneficia a instaladores y propietarios por igual y puede generar importantes ahorros en la factura de calefacción.

Características

- Sin bloqueos.
- Auto-ajustable.
- Evita las partidas en seco.
- Líder del mercado en eficiencia energética.

CÓDIGO	MODELO	PRECIO LISTA USD
98890768	Bomba grundfos alpha3 25-50 180 50 hz	628
98890769	Alpha3 25-60 180 50 hz	657
98890770	Bomba grundfos alpha3 25-80 180 50 hz	724
98916967	Mi401 alpha reader	184

Curvas



Especificaciones Técnicas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Caudal Máximo	3.8 m ³ /h
Temperatura del líquido	+2° C a +110° C
Nivel de presión sonora	< 43 dB (A)
Temperatura ambiente	0° C a +40° C
Índice de Eficiencia Energética	IEE < 0,15 (en bombas de 4 metros)

RANGO		Rango de rendimiento			
Material del cuerpo	Longitud (mm)	4 m.	5 m.	6 m.	8 m.
Fundición	130	x	x	x	x
	180	x	x	x	x
Acero inoxidable	130	x	x	x	x
	180	x	x	x	x
Fundición - purgador aire	180	x		x	

Figura D.3: Bomba circuladora para vivienda [2]

Descripción del Producto

Las nuevas MAGNA3 son una gama de circuladoras inteligentes y con una eficiencia superior perfectas para todo tipo de aplicaciones como:

Características:

- Calefacción
- Aire acondicionado
- Refrigeración
- Sistemas de agua caliente sanitaria
- Sistemas geotérmicos de calefacción
- Sistemas solares de calefacción
- Contador de energía térmica
- Reduce la necesidad de válvulas de equilibrado
- Modo inteligente AUTO ADAPT
- Perfecta para gestión de edificios

Bomba Circuladora Inteligente Magna 3



- LA GAMA MÁS COMPLETA: Más de 200 bombas sencillas y dobles para un fácil dimensionamiento en cualquier punto de trabajo
- LA MEJOR EFICIENCIA ENERGÉTICA: El mejor IEE del mercado con una reducción de costes energéticos de hasta un 75%
- INTELIGENCIA SUPERIOR: Las nuevas funciones FLOWLIMIT y FLOWADAPT, junto al reconocido modo AUTO ADAPT, permiten un control total del sistema
- FÁCIL INSTALACIÓN: Su interfaz de usuario, totalmente intuitivo y fácil de manejar, ahorra tiempo y esfuerzos durante la instalación

- APLICACIONES MÚLTIPLES: La bomba maneja líquidos entre -10° C y 110° C. Funciona independientemente de la temperatura ambiente - lo que la convierte en la circuladora perfecta tanto para proyectos de calefacción como de refrigeración

CÓDIGO	MODELO	PRECIO LISTA USD
G97924244	Magna3 25-40 180 1x230v pn10	832
G97924245	Magna3 25-60 180 1x230v pn10	988
G97924246	Magna3 25-80 180 1x230v pn10	1.126
G97924247	Magna3 25-100 180 1x230v pn10	1.235
G97924248	Magna3 25-120 180 1x230v pn10	1.389
G97924254	Magna3 32-40 180 1x230v pn10	1.022
G97924255	Magna3 32-60 180 1x230v pn10	1.196
G97924256	Magna3 32-80 180 1x230v pn10	1.248
G97924257	Magna3 32-100 180 1x230v pn10	1.355
G97924258	Magna3 32-100 f 220 1x230v pn6/10	1.578
G97924259	Magna3 32-120 f 220 1x230v pn6/10	1.892
G97924266	Magna3 40-40 f 220 1x230v pn6/10	1.403
G97924267	Magna3 40-60 f 220 1x230v pn6/10	1.526
G97924268	Magna3 40-80 f 220 1x230v pn6/10	1.892
G97924269	Magna3 40-100 f 220 1x230v pn6/10	2.087
G97924270	Magna3 40-120 f 250 1x230v pn6/10	2.387
G97924271	Magna3 40-150 f 250 1x230v pn6/10	2.829
G97924272	Magna3 40-180 f 250 1x230v pn6/10	3.254
G97924280	Magna3 50-40 f 240 1x230v pn6/10	2.087
G97924281	Magna3 50-60 f 240 1x230v pn6/10	2.458
G97924282	Magna3 50-80 f 240 1x230v pn6/10	2.706
G97924283	Magna3 50-100 f 280 1x230v pn6/10	2.865
G97924284	Magna3 50-120 f 280 1x230v pn6/10	3.024
G97924285	Magna3 50-150 f 280 1x230v pn6/10	3.484
G97924286	Magna3 50-180 f 280 1x230v pn6/10	4.085
G97924287	Magna3 50-40 f 240 1x230v pn16	2.441
G97924294	Magna3 65-40 f 340 1x230v pn6/10	2.617
G97924295	Magna3 65-60 f 340 1x230v pn6/10	2.989
G97924296	Magna3 65-80 f 340 1x230v pn6/10	3.254
G97924297	Magna3 65-100 f 340 1x230v pn6/10	3.431
G97924298	Magna3 65-120 f 340 1x230v pn6/10	3.678
G97924299	Magna3 65-150 f 340 1x230v pn6/10	4.290
G97924306	Magna3 80-40 f 360 1x230v pn6	3.130
G97924307	Magna3 80-60 f 360 1x230v pn6	3.448
G97924308	Magna3 80-80 f 360 1x230v pn6	3.714
G97924309	Magna3 80-100 f 360 1x230v pn6	4.110

Figura D.4: Bomba circuladora para red de distribución y red geotermia [2]

D.4. Tuberías y sondas

Uponor Radi Pipe



La gama de tuberías Uponor Radi Pipe están fabricadas en polietileno reticulado (PEX-a) de la más alta calidad con barrera antidifusión de oxígeno (EVOH) y diseñadas para su utilización en instalaciones

de calefacción por radiadores así como tuberías de distribución en instalaciones radiantes de frío/calor.

Ventajas

- Calidad certificada.
- Barrera antidifusión de oxígeno.
- Resistentes a la corrosión.
- Memoria térmico-elástica.
- Ligeras y flexibles.
- Duraderas.



Especificación

- Tuberías de polietileno reticulado (PEX-a) fabricadas acorde a EN ISO 15875.
- Barrera antidifusión de oxígeno (EVOH) según DIN 4726.
- Clases de aplicación: Clase 5, radiadores a alta temperatura.
- Clasificación al fuego E acorde a DIN EN 13501-1.

Aplicación

- Calefacción: temperatura de trabajo en continuo hasta 80 °C a una presión máxima continua de 6 bar. La temperatura a corto plazo puede llegar hasta 100 °C (100 h útiles).

Certificación

- AENOR.

Uponor Comfort Pipe PLUS

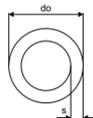
- 6 bar a 80 °C



Código Uponor	Dimensión	L m	do mm	s mm	p bar	V l/m	color	Uds. uPoints	Uds. Palet	Uds. Caja	PVP/m. ud.
1062045	16x2,0	240m	240	16	2	6	0,113 blanco	700	1440	240	MTR 2,21 €
1009230	20x2,0	240m	240	20	2	6	0,2 blanco	1000	960	240	MTR 3,03 €
1062887	25x2,3	60m	60	25	2,3	6	blanco	840	60	MTR	4,33 €

Uponor Radi Pipe natural PN6

- Presión operativa 6 bar.
- Tubería en rollo.
- Color natural.



Código Uponor	Dimensión	L m	do mm	s mm	p bar	color	Uds. uPoints	Uds. Palet	Uds. Caja	PVP/m. ud.
1001220	32x2,9	50m	50	32	2,9	6 natural	300	250	50	MTR 9,01 €
1008979	40x3,7	50m	50	40	3,7	6 natural	950	250	50	MTR 12,36 €
1008980	50x4,6	50m	50	50	4,6	6 natural	1500	250	50	MTR 18,02 €
1008981	63x5,8	50m	50	63	5,8	6 natural	2550	250	50	MTR 29,28 €

Figura D.5: Tarifas Tuberías Ecoflex para red principal [57]

Uponor Ecoflex Thermo Single

- Calefacción/refrigeración.
- 1 tubo de servicio PEX-a con barrera antidifusión de oxígeno.
- Presión y temperatura máx: 6 bar / 95 °C.
- Aislamiento espuma PEX.
- Carcasa PEAD corrugado.



Código Uponor	Dimensión	do mm	do1 mm	s1 mm	R mm	Peso kg	Uds. Caja	MTR	PVP/m. ud.
1018110	32x2,9/140	140	32	2,9	0,3	1,31	200	MTR	62,50 €
1018111	40x3,7/175	175	40	3,7	0,35	2,2	200	MTR	77,50 €
1018112	50x4,6/175	175	50	4,6	0,45	2,4	200	MTR	97,50 €
1018113	63x5,8/175	175	63	5,8	0,55	2,8	200	MTR	128,50 €
1018114	75x6,8 /200	200	75	6,8	0,8	3,74	100	MTR	154,50 €
1018115	90x8,2/200	200	90	8,2	1,1	4,2	100	MTR	170,00 €
1018116	110x10,0/200	200	110	10	1,2	5,24	100	MTR	196,00 €
1083868	125x11,4/250	250	125	11,4	1,4	7,25	120	MTR	238,00 €

Figura D.6: Tarifas Tuberías Ecoflex para red principal [57]

Uponor Ecoflex Thermo Mini

- Calefacción/refrigeración.
- 1 tubo de servicio PEX-a con barrera antidifusión de oxígeno.
- Presión y temperatura máx: 6 bar / 95 °C.
- Aislamiento espuma PEX.
- Carcasa PEAD corrugado.



Código Uponor	Dimensión	do mm	do1 mm	s1 mm	R mm	Peso kg	Uds. Caja	MTR	PVP/m. ud.
1018132	25x2,3/68	68	25	2,3	0,2	0,5	200	MTR	39,00 €
1018133	32x2,9/68	68	32	2,9	0,25	0,55	200	MTR	49,00 €

Figura D.7: Tarifas Tuberías Ecoflex para conexión a vivienda [57]

SISTEMAS DE CAPTACIÓN

Color NEGRO · Para otras longitudes de sonda, consultar.

SONDA VERTICAL GEOTÉRMICA SIMPLE PE 100 1,6 Mpa. (16 ATM)				
Ø Ext. (mm)	Código	Espesor (mm)	M/Sonda	€/Sonda
40	246001	3,7	80	381,99
40	246002	3,7	100	461,04
40	246003	3,7	125	559,88
40	246004	3,7	150	658,61



SONDA VERTICAL GEOTÉRMICA DOBLE PE 100 1,6 Mpa. (16 ATM)				
Ø Ext. (mm)	Código	Espesor (mm)	M/Sonda	€/Sonda
32	246005	2,9	80	507,76
32	246006	2,9	100	610,06
32	246007	2,9	125	737,87
32	246008	2,9	150	865,78
40	246009	3,7	80	753,88
40	246010	3,7	100	911,98
40	246011	3,7	125	1.109,56
40	246012	3,7	150	1.307,13



SONDA HORIZONTAL GEOTÉRMICA SIMPLE PE 100 1,6 Mpa. (16 ATM)				
Ø Ext. (mm)	Código	Espesor (mm)	M/Sonda	€/Sonda
25	246013	2,3	100	88,23
32	246014	2,9	100	138,06
40	246015	3,7	100	207,88

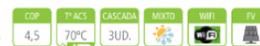


Figura D.8: Sondas para sistemas de captación cerrados [33]

D.5. Bombas de calor Ecoforest

ecoGEO Basic 1-9 kW

		B1 1-9_230V	B1 1-9_400V	B2 1-9_230V	B2 1-9_400V	B3 1-9_230V	B3 1-9_400V	B4 1-9_230V	B4 1-9_400V
ecoGEO	Referencia	21113/1	23113/1	21123/1	23123/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	6.890 €	7.130 €	7.490 €	7.730 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO EH	Referencia	21112/1	23112/1	21122/1	23122/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	7.090 €	7.330 €	7.690 €	7.930 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO HTR	Referencia	21111/1	23111/1	21121/1	23121/1	21131/1	23131/1	21141/1	23141/1
	Precio	7.290 €	7.530 €	7.890 €	8.130 €	7.990 €	8.230 €	8.550 €	8.790 €
ecoGEO HTR EH	Referencia	21110/1	23110/1	21120/1	23120/1	21130/1	23130/1	21140/1	23140/1
	Precio	7.490 €	7.730 €	8.090 €	8.330 €	8.190 €	8.430 €	8.750 €	8.990 €



EH: modelo con resistencia eléctrica de apoyo HTR: modelo con tecnología HTR ND: modelo no disponible

ecoGEO Basic 3-12 kW

		B1 3-12_230V	B1 3-12_400V	B2 3-12_230V	B2 3-12_400V	B3 3-12_230V	B3 3-12_400V	B4 3-12_230V	B4 3-12_400V
ecoGEO	Referencia	21213/1	23213/1	21223/1	23223/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	7.690 €	7.930 €	8.290 €	8.530 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO EH	Referencia	21212/1	23212/1	21222/1	23222/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	7.890 €	8.130 €	8.490 €	8.730 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO HTR	Referencia	21211/1	23211/1	21221/1	23221/1	21231/1	23231/1	21241/1	23241/1
	Precio	8.090 €	8.330 €	8.690 €	8.930 €	8.790 €	9.030 €	9.390 €	9.630 €
ecoGEO HTR EH	Referencia	21210/1	23210/1	21220/1	23220/1	21230/1	23230/1	21240/1	23240/1
	Precio	8.290 €	8.530 €	8.890 €	9.130 €	8.990 €	9.130 €	9.590 €	9.830 €



ecoGEO Basic 5-22 kW

		B1 5-22_230V	B1 5-22_400V	B2 5-22_230V	B2 5-22_400V	B3 5-22_230V	B3 5-22_400V	B4 5-22_230V	B4 5-22_400V
ecoGEO	Referencia	21313/1	23313/1	21323/1	23323/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	8.750 €	9.020 €	9.350 €	9.620 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO EH	Referencia	21312/1	23312/1	21322/1	23322/1	ND	ND	ND	ND
	Precio	8.950 €	9.220 €	9.550 €	9.820 €	ND	ND	ND	ND
ecoGEO HTR	Referencia	21311/1	23311/1	21321/1	23321/1	21331/1	23331/1	21341/1	23341/1
	Precio	9.150 €	9.420 €	9.750 €	10.020 €	9.850 €	10.120 €	10.350 €	10.620 €
ecoGEO HTR EH	Referencia	21310/1	23310/1	21320/1	23320/1	21330/1	23330/1	21340/1	23340/1
	Precio	9.350 €	9.620 €	9.950 €	10.220 €	10.050 €	10.320 €	10.550 €	10.820 €



ecoGEO HP 12-40 kW

		HP1	HP3
ecoGEO HP 12-40	Referencia	53413	53433
	Precio	14.950 €	16.150 €

ecoGEO HP 15-70 kW

		HP1	HP3
ecoGEO HP 15-70	Referencia	53513	53533
	Precio	19.250 €	20.450 €



Figura D.9: Tarifas BCG 2020 [26]

D.6. Vaso de Expansión

Descripción

- Estanque de expansión con membrana intercambiable.
- Presión máxima de ejercicio: 8 o 10 bar (según modelo).
- Presión máxima de precarga: 1,5 bar.
- Temperatura de trabajo: -10°C/ +100°C.

Imera Serie R-RV Estanque de Expansión para Calefacción



CÓDIGO	MODELO	PRECIO DE LISTA USD
00.151.01	Estanque expansion R 12 lts	41,71
00.151.02	Estanque expansion R 18 lts	46,98
00.151.03	Estanque expansion R 24 lts	53,85
00.151.04	Estanque expansion R 35 lts	90,79
00.151.05	Estanque expansion R 50 lts	105
00.151.06	Estanque expansion RV 80 lts	171
00.151.07	Estanque expansion RV 100 lts	204
00.151.08	Estanque expansion RV 150 lts	283
00.151.09	Estanque expansion RV 200 lts	355
00.151.10	Estanque expansion RV 250 lts	436
00.151.11	Estanque expansion RV 300 lts	494
00.151.13	Estanque expansion RV 500 lts	916
00.151.13A	Estanque expansion RV 600 lts	1.667
00.151.14A	Estanque expansion RV 750 lts	2.664
00.151.14B	Estanque expansion RV 1.000 lts	4.568
00.151.14D	Estanque expansion RV 2.000 lts	8.210
00.151.14C	Estanque expansion RV 3.000 lts	12.559

Figura D.10: Vaso de expansión para sistemas de climatización [2]

D.7. Estanque de inercia

■ Depósitos de Inercia



Modelo	Referencia	Precio (€)
T-B 200	857	720
T-B 300	858	1.070
T-B 500	863	1.450
T-B 750	864	1.840
T-B 1000	860	2.090
T-B 2000	861	3.090

Figura D.11: Estanque de inercia

D.8. Intercambiador de calor de placas

Intercambiadores

■ Intercambiador de aguas freáticas



Modelo	Referencia	Precio (€)
Intercambiador 11 kW	3008	1.490
Intercambiador 22 kW	3009	1.850
Intercambiador 40 kW	3190	4.250
Intercambiador 70 kW	3191	5.390
Intercambiador 100 kW	3192	7.390

Intercambiadores de agua freática Secespol de alta eficiencia en procesos de intercambio térmico para aplicaciones domésticas e industriales

Especialmente dimensionados para las bombas de calor Ecoforest

Figura D.12: Intercambiador de placas planas

D.9. Servicios

D.9.1. Movimiento de tierras

ADE010 m³ Excavación de zanjas y pozos. \$ 11.433,24

Excavación de zanjas para fundaciones hasta una profundidad de 2 m, en suelo de arcilla semidura, con medios mecánicos, y carga a camión. El precio no incluye el transporte de los materiales excavados.

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Importe
1		Maquinaria			
mq01exn020b	h	Retroexcavadora hidráulica sobre neumáticos, de 115 kW.	0,383	26.341,20	10.088,68
			Subtotal maquinaria:		10.088,68
2		Mano de obra			
mo113	h	Jornal construcción.	0,287	3.903,77	1.120,38
			Subtotal mano de obra:		1.120,38
3		Herramientas			
	%	Herramientas	2,000	11.209,06	224,18
			Costos directos (1+2+3):		11.433,24

Figura D.13: Servicio de movimiento de tierras. Valor por m³

D.9.2. Perforación para sistemas verticales cerrados - Aysén Drilling

2.1.- COTIZACION PERFORACION

a) Perforación Diamantina Diámetro PQ

TRAMOS PQ				
DESDE		HASTA	(Pesos Chilenos/mt.)	VALOR POR METRO
0	-	80	\$/MTS	135.000
81	-	130	\$/MTS	155.000

b) Valor adicional desviación de trayectoria de giroscopio.

➤ \$350.000 por pozo perforado.

Sin otro particular y quedando a la espera de vuestros comentarios, le saludan muy atentamente;



RODRIGO GÓMEZ VIDAL

Gerente General

Figura D.14: Servicio de perforación