



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

DISEÑO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN URBANA CON APROVECHAMIENTO DE GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN UN PROYECTO DE VIVIENDAS DE INTEGRACIÓN SOCIAL EN CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

VÍCTOR MANUEL RODRÍGUEZ NÚÑEZ

PROFESOR GUÍA
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
BEATRIZ MATURANA COSSIO
MAURICIO MUÑOZ MORALES

Este trabajo forma parte de la investigación Fondecyt N°11130636 titulada Viviendas de integración social y la sustentabilidad medio ambiental: una investigación de proyectos claves en Chile.

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Víctor Manuel Rodríguez Núñez

FECHA: 13/10/2015

PROFESOR GUÍA: Ramón Frederick González

DISEÑO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN URBANA CON APROVECHAMIENTO DE GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA EN UN PROYECTO DE VIVIENDAS DE INTEGRACIÓN SOCIAL EN CHILE.

Esta memoria surgió como un trabajo anexo a la investigación de la profesora Dra. Beatriz Maturana Cossio del Instituto de la Vivienda de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Chile, a través del proyecto Fondecyt N°11130636: "Viviendas de Integración Social y la Sustentabilidad Medio Ambiental: una Investigación de Proyectos Claves en Chile".

Esta investigación le permitió al estudiante ubicarse en un contexto real para aplicar una solución de ingeniería y eficiencia energética, la cual consiste en el diseño y estudio de pre-factibilidad de un sistema de bombas de calor geotérmicas para ser utilizado en la climatización de 2.088 viviendas de integración social que componen el proyecto San Alberto de Casas Viejas en Puente Alto, Santiago.

El informe aborda los antecedentes necesarios para identificar la tecnología de interés. Se describe qué se entiende por geotermia de baja entalpía y su aprovechamiento por medio de bombas de calor.

Con respecto a la metodología, se calcula la demanda energética para la climatización de las viviendas, y se determina el caudal de agua necesario que se debe bombear desde la fuente geotermal para suministrar de energía los sistemas de bombas calor. Luego, se modela el efecto que tiene en el acuífero la reinyección de agua más fría en invierno y más caliente en verano, y finalmente se dimensionan y caracterizan los principales componentes del sistema para estimar el costo de inversión, costo de operación y ahorro que determinarán la factibilidad económica de la propuesta.

Se obtiene que el costo de inversión para el sistema de calefacción es en promedio de 15 millones de dólares y que el ahorro en el gasto de operación anual es de al menos 58% con respecto al gasto anual en climatización por medios convencionales alternativos. Se concluye que, tanto en un escenario favorable como uno promedio, la inversión se paga en un horizonte de entre 4 y 20 años. Además, es necesario considerar los beneficios sociales en medioambiente, salud y equidad social para justificar la inversión del proyecto, si se quiere, por parte del Estado.

Finalmente, se discuten y proponen tres alternativas que lograrían reducir considerablemente el costo de inversión y los gastos de operación.

A los vecinos de San Alberto de Casas Viejas.

Ojalá que este trabajo no se llene de polvo.

Agradecimientos

Al Profe Ramón, la Profe Beatriz y Mauricio, por confiar, sin haberme conocido, en nuestra idea y en mí.

A mi Sensei y equipo de judo por mostrarme el Dō.

A Camilo por apañar, y a Consu por molestar.

A Scarlet por la ayuda y el ánimo.

A mis amigos del mundo, de viajes y la vida.

A mis maestros.

A quienes hacen la diferencia.

A Lila y Lulú por acompañarme en las noches de trabajo.

A mis padres, hermanos y abuelos, los amo.

Este trabajo no es mío, sino de todos. Muchas gracias.

Tabla de Contenido

Índice de tablas	ix
Índice de ilustraciones.....	xi
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3.3. Alcances.....	3
2. Antecedentes	5
2.1. Geotermia de Baja Entalpía	5
2.2. Sistema de Bomba de Calor Geotérmica.....	7
2.2.1. Bomba de Calor	7
2.2.2. Intercambiador de Calor Subterráneo	9
2.3. San Alberto de Casas Viejas.....	11
2.4. Geotermia en Chile.....	12
3. Metodología.....	15
4. Dimensionamiento y Resultados	17
4.1. Cálculo de Cargas Térmicas.....	17
4.1.1. Modelo de Clima para Santiago	19
4.1.2. RES ₁ – Pérdidas por Transmisión (Conductivas y Convectivas).....	19
4.1.3. RES ₂ – Ganancias Solares (Sensibles)	21
4.1.4. RES ₃ – Ganancias Internas (Sensibles)	24
4.1.5. RES ₄ – Cargas por Ventilación (Sensibles)	24
4.1.6. RES ₅ – Cargas por Ventilación (Latente)	25
4.1.7. RES ₆ – Ganancias Internas (Latente)	26
4.1.8. Resumen de Resultados	26
4.1.9. Estudio de Sensibilidad.....	27
4.2. Cálculo de Suministro de Agua desde el Acuífero	29

4.2.1.	Caudal de agua subterránea	29
4.2.2.	Definición de Módulos del Sistema.....	32
4.2.3.	Cálculo de caudal de agua subterránea para cada módulo	33
4.3.	Modelamiento y Evaluación de la Anomalía Geotermal	35
4.3.1.	Contexto Geológico	35
4.3.2.	Modelo Numérico.....	36
4.3.3.	Parámetros Hidrogeológicos y Térmicos del Modelo	37
4.3.4.	Ubicación de pozos	38
4.4.	Dimensionamiento y Caracterización de Equipos	52
4.4.1.	Intercambiadores de Calor Intermedios.....	52
4.4.2.	Bombas de Calor Geotérmicas	55
4.4.3.	Sistema de Distribución	57
4.4.4.	Ciclo Abierto	58
4.4.5.	Red de Distribución Distrital.....	61
4.5.	Evaluación Económica.....	64
4.5.1.	Inversión.....	64
4.5.2.	Consumo Anual.....	70
4.5.3.	Ahorro Anual.....	74
4.5.4.	Factibilidad Económica.....	75
4.6.	Evaluación Social.....	78
4.7.	Aspectos por Mejorar	79
5.	Conclusiones.....	83
6.	Bibliografía.....	85
Anexos.....		91
Anexo A.	Calculo de Coeficientes de Transmisión Térmica (U).....	91
Anexo B.	Detalle Módulos Condominio.	97
Anexo C.	Información Técnica y Precios Bombas de Calor.....	98
Anexo D.	Información Técnica y Precios Fan Coils.....	100
Anexo E.	Tabla de Frecuencia de Temperatura (Bin Method)	101
Anexo F.	Carga Térmica de Viviendas en Función de Temperatura Exterior.....	102
Anexo G.	Demanda Energética Anual por Par de Casas	103

Índice de tablas

Tabla 2-1: Especificaciones técnicas según tipología.	12
Tabla 4-1: Datos estadísticos de clima para Santiago.	19
Tabla 4-2: Resumen cálculo de Pérdidas por transmisión	21
Tabla 4-3: Resumen cálculo de ganancias solares.	23
Tabla 4-4: Resumen cálculo de ganancias internas sensibles.	24
Tabla 4-5: Resumen cálculo de cargas sensibles por ventilación.	25
Tabla 4-6: Resumen cálculo de cargas latentes por ventilación.....	26
Tabla 4-7: Resumen cálculo de ganancias internas latentes.	26
Tabla 4-8: Consolidación de resultados de cálculo de carga térmica.....	27
Tabla 4-9: Carga térmica para condiciones reales de hermeticidad al aire	28
Tabla 4-10: Carga térmica para condiciones ideales de hermeticidad al aire	28
Tabla 4-11: Carga térmica para condiciones ideales de envolvente térmica.	28
Tabla 4-12: Carga térmica para condiciones ideales de envolvente térmica y hermeticidad al aire.	28
Tabla 4-13: Coeficientes de correlación para polinomio cuadrático usados en la ecuación (4-30).	31
Tabla 4-14: Módulos representativos “San Alberto de Casas Viejas” en Puente Alto.	32
Tabla 4-15: Valores comunes a todos los módulos para el cálculo de caudal de agua subterránea.	33
Tabla 4-16: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo A.....	33
Tabla 4-17: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo B.....	34
Tabla 4-18: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo C.	34
Tabla 4-19: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo D.	34
Tabla 4-20: Parámetros hidrogeológicos y térmicos.	37
Tabla 4-21: Evolución de la temperatura promedio en los planos de interés.	52
Tabla 4-22: Dimensionamiento de los intercambiadores de calor de placa.	55
Tabla 4-23: Dimensionamiento de bombas de calor geotérmicas.....	56
Tabla 4-24: Dimensionamiento de fan coils.....	58
Tabla 4-25: Resumen de valores cotizados por Municipalidad.	59
Tabla 4-26: Dimensionamiento de pozos.	60
Tabla 4-27: Costos de instalación de redes de distribución	62

Tabla 4-28: Dimensionamiento de la red de suministro por lote.....	62
Tabla 4-29: Costos típicos de un sistema GSHP de ciclo abierto	64
Tabla 4-30: Costo preliminar de inversión del proyecto según [44]. Solo calefacción....	65
Tabla 4-31: Costo preliminar de inversión del proyecto según [44]. Calefacción y enfriamiento.....	65
Tabla 4-32: Estimativo de costos de construcción de un sistema GWHP de ciclo abierto según [45].....	66
Tabla 4-33: Estimación del costo de inversión en base a [45]. Solo calefacción.....	67
Tabla 4-34: Estimación del costo de inversión en base a [45]. Calefacción y enfriamiento.....	68
Tabla 4-35: Costo total de inversión.....	69
Tabla 4-36: Resumen de costo total de inversión	70
Tabla 4-37: Ejemplo del cálculo de demanda energética.....	71
Tabla 4-38: Demanda energética anual por par de viviendas.....	72
Tabla 4-39: Gasto anual en electricidad por vivienda.....	73
Tabla 4-40: Consumo mensual potencial por métodos convencionales alternativos y por tipología de casa.....	74
Tabla 4-41: Ahorro mensual por tipología de casa y para los métodos alternativos de climatización.....	75
Tabla 4-42: Ahorro anual por tipología de casa y para los métodos alternativos de climatización.....	75
Tabla 4-43: Costos de inversión e instalación de los métodos alternativos de climatización.....	76
Tabla 4-44: Descripción de escenarios de evaluación del retorno de la inversión.....	76
Tabla 4-45: Calculo del retorno de la inversión para distintos escenarios y sistemas alternativos de climatización.....	76
Tabla 4-46: Comparación de distintos sistemas de calefacción	78
Tabla 4-47: Calculo del retorno de la inversión para distintos escenarios y sistemas alternativos de climatización cuando se ahorra en la inversión inicial.....	81

Índice de ilustraciones

Figura 2-1: Distribución de la energía solar en la tierra.....	5
Figura 2-2: Temperatura mensual promedio típica en Santiago.....	6
Figura 2-3: Usos de la Energía Geotérmica según la Temperatura del Recurso.....	6
Figura 2-4: Ciclo termodinámico de una bomba de calor típica.....	9
Figura 2-5: Ciclo abierto de agua subterránea.....	10
Figura 2-6: Vista aérea emplazamiento.....	11
Figura 2-7: Plano y tipología de viviendas del proyecto San Alberto de Casas Viejas.....	11
Figura 4-1: Carga por bloque vs. Distinción zonal.....	17
Figura 4-2: Componentes de Cargas Térmicas.....	18
Figura 4-3: Bomba de calor geotérmica indirecta de ciclo abierto.....	30
Figura 4-4: Distribución de módulos de casas proyecto “San Alberto de Casas Viejas” en Puente Alto.....	32
Figura 4-5: Altura piezométrica en torno al área de interés.....	35
Figura 4-6: Dominio del modelo: 2000 x 1500 x 90 m ³	36
Figura 4-7: Pluma termal de la TAZ e interacción con otros sistemas de pozos.....	38
Figura 4-8: Zona de afectación termal al final del periodo de verano para un sistema. .	39
Figura 4-9: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de verano.	39
Figura 4-10: Zona de afectación termal al final del periodo de otoño.....	40
Figura 4-11: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de otoño.	40
Figura 4-12: Zona de afectación termal al final del periodo de invierno.	41
Figura 4-13: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de invierno.	41
Figura 4-14: Zona de afectación termal al final del periodo de primavera.....	42
Figura 4-15: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de primavera.....	42
Figura 4-16: Restricciones de separación de pozos.....	43
Figura 4-17: Vista en corte con ubicación de pozos según profundidad	43
Figura 4-18: Localización de pozos.....	44
Figura 4-19: Zona de afectación termal al final del periodo de verano.....	45
Figura 4-20: Zona de afectación termal al final del periodo de otoño.....	46
Figura 4-21: Zona de afectación termal al final del periodo de invierno	47
Figura 4-22: Zona de afectación termal al final del periodo de primavera	48
Figura 4-23: TAZ al término del verano del segundo año	50

Figura 4-24: TAZ al término del otoño del segundo año	50
Figura 4-25: TAZ al término del invierno del segundo año.....	51
Figura 4-26: TAZ al término de la primavera del segundo año.....	51
Figura 4-27: Vista explosionada de un intercambiador de placas.	53
Figura 4-28: Intercambiador de calor de placas y bombas de circulación en sistema de calefacción distrital geotérmico en Oregón, EEUU.....	54
Figura 4-29: Variedades de bombas de calor geotérmicas	56
Figura 4-30: Fan coil	57
Figura 4-31: Detalles típicos de la construcción de un pozo geotermal	59
Figura 4-32: Modelo de costo de perforación	60
Figura 4-33: Diagrama de flujo red de distribución	61
Figura 4-34: Red de distribución distrital de un módulo representativo del condominio.	63
Figura 4-35: Distribución de costos de la inversión	69
Figura 4-36: Carga térmicas de las distintas tipologías de vivienda según temperatura del aire exterior.....	72
Figura 4-38: Diagrama de flujo red de distribución con tanques de almacenamiento térmico	80

1. Introducción

1.1. Antecedentes Generales

En el actual escenario energético nacional, concentrado principalmente en la obtención de energía en base a combustibles fósiles (66% de la oferta total de energía) [1], en su mayoría importados (90% de los combustibles fósiles) [1], es necesaria la búsqueda de alternativas energéticas renovables, que sean limpias y se encuentren disponibles en el territorio nacional.

Según la Comisión Nacional de Energía [1], en Chile, el año 2013, un 25% de consumo final de energía se produjo en el sector comercial, público y residencial. Cerca del 47% del total de esta energía provino de la leña, seguido de derivados del petróleo (20%), gas natural (8%), energía solar térmica (0,2%), y electricidad (25%). Por su parte, un 64% de la electricidad es producida en base a combustibles fósiles (petróleo refinado, carbón, gas natural) y un 26% en base a biomasa y leña.

Según la Agencia Internacional de Energía [2] el sector comercial, público y residencial representa el 33% del consumo final de energía promedio de los países OCDE; menos del 50% del total de esta energía proviene de combustibles fósiles, y un 45% proviene de electricidad. 59% de la electricidad es producida en base a combustibles fósiles.

En particular, la implementación de sistemas eficientes de calefacción y refrigeración genera una oportunidad para reducir el consumo energético y contribuir al plan de ahorro impulsado por las autoridades [3].

Una alternativa atractiva es la geotermia de baja entalpía, que consiste en utilizar el subsuelo como fuente o sumidero de calor para, por medio de bombas de calor, calefaccionar en invierno y enfriar en verano respectivamente. Esta solución es muy eficiente y amigable con el medio ambiente. En la práctica constituye una tecnología que produce una disminución de las emisiones de CO₂, lo que reduce la contaminación ambiental y contribuye a la mitigación del calentamiento global [4].

Al mismo tiempo, el desarrollo energético, y el sentido de eficiencia hacia el cual está evolucionando el país, deben ser transversales en los distintos sectores socio-económicas de la población.

Durante las dos últimas décadas, el creciente interés por la sustentabilidad y calidad de vida se han reflejado en las políticas de desarrollo urbano [5]. Sin embargo estos aspectos no se han materializado en las políticas públicas de vivienda de integración social. Tales proyectos podrían ser objeto de implementación de sistemas eficientes de climatización en base a fuentes de energía renovables, que generen un ahorro en el consumo de energía, una contribución a la preservación del medio ambiente y un acceso a una mejor calidad de vida para su población.

1.2. Motivación

Esta memoria surge como un trabajo anexo a la investigación de la profesora Dra. Beatriz Maturana Cossio, del Instituto de la Vivienda de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Chile, a través del proyecto Fondecyt N°11130636: "Viviendas de Integración Social y la Sustentabilidad Medio Ambiental: una Investigación de Proyectos Claves en Chile".

Gracias a esta investigación se puede acceder a un contexto real en cual proponer la implementación de un sistema eficiente de climatización en base a energías renovables no convencionales.

El proyecto de viviendas de integración social estudiado en este trabajo corresponde al condominio San Alberto de Casas Viejas ubicado en la comuna de Puente Alto, Santiago. Comprende la urbanización de 14 hectáreas con la construcción de 2088 viviendas. Esta villa combina viviendas sin deuda para familias beneficiarias del Fondo Solidario de Vivienda, viviendas subsidiadas para familias beneficiarias del programa para sectores medios (subsidio DS40), y también viviendas de venta directa. Cuenta con cuatro tipologías de viviendas de dos pisos, con superficies totales de 45, 50, 56 y 61 m², agrupadas en ocho barrios alrededor de áreas verdes, juegos infantiles y un colegio.

La motivación de este trabajo es proponer un sistema de climatización urbana con aprovechamiento de geotermia de baja entalpía para climatizar los hogares de este proyecto inmobiliario, entregándole a la comunidad una oportunidad de invertir en un proyecto que vaya en beneficio de su calidad de vida, disminuyendo las brechas en el acceso a la climatización entre familias de distintos sectores socio-económicos, y que genere un ahorro en el gasto energético por climatización de los hogares con respecto a métodos convencionales alternativos.

1.3. Objetivos

Se establecen el siguiente objetivo general y los siguientes objetivos generales.

1.3.1. Objetivo General

Realizar un diseño y estudio de pre-factibilidad técnica y económica de un sistema de bombas de calor geotérmicas para la climatización del proyecto de viviendas de integración social San Alberto de Casas Viejas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estimar la demanda energética de las viviendas en invierno y verano en base a sus cargas térmicas y a condiciones de confort térmico.
- Identificar el recurso geotérmico en cuanto a temperatura del acuífero y disponibilidad de caudal para extracción.

- Modelar y evaluar la anomalía termal en el subsuelo provocada por la extracción y reinyección de agua en el acuífero.
- Dimensionar y caracterizar los principales componentes del sistema.
- Analizar la pre-factibilidad económica y social del sistema: Inversión, ahorro energético, recuperación de la inversión y externalidades.

1.3.3. Alcances

El dimensionamiento y evaluación del proyecto corresponden a una etapa de ingeniería básica, que incluye los aspectos conceptuales y especificaciones básicas necesarias para evaluar una factibilidad preliminar del proyecto.

2. Antecedentes

A continuación se presentan los antecedentes básicos para comprender la propuesta tecnológica a esta solución de climatización urbana.

2.1. Geotermia de Baja Entalpía

El 46% de la energía proveniente del sol es absorbida por la tierra (Figura 2-1) [6]. Esta energía está disponible en toda la superficie de la tierra, por lo que se puede utilizar para calefaccionar y enfriar ambientes habitables.

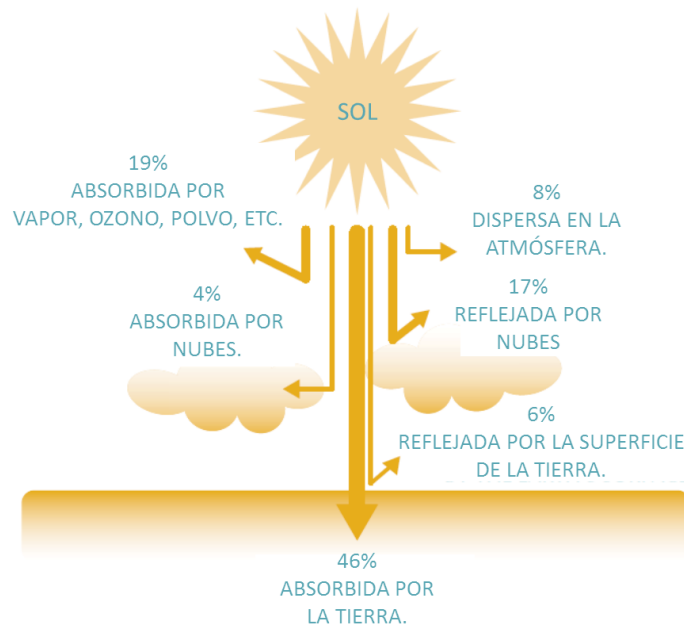


Figura 2-1: Distribución de la energía solar en la tierra. Fuente: Adaptado de RETScreen (2009) [6]

Debido a que el suelo posee una baja difusividad térmica y posee una alta capacidad de almacenamiento de energía, su temperatura cambia muy lentamente –en el orden de meses o incluso años, dependiendo de la profundidad. Como consecuencia de esta alta inercia térmica el suelo puede transferir calor en invierno a espacios que estén a la temperatura ambiente atmosférica, y recibir calor de éstos en verano.

Otra característica termal del subsuelo es que, a pocos metros de profundidad, los sedimentos y agua subterránea se encuentran prácticamente aislados de la influencia climática de la superficie, por lo que la amplitud en la variación de su temperatura se ve minimizada considerablemente en comparación a la temperatura del aire sobre la superficie, tal cual se muestra en la Figura 2-2. Esta resistividad térmica permite que el subsuelo sea más caliente que el aire ambiente en invierno, y más frío que el aire ambiente en verano. Por lo anterior, funciona como una fuente de energía disponible y renovable que puede ser aprovechada para climatizar viviendas en invierno y verano.

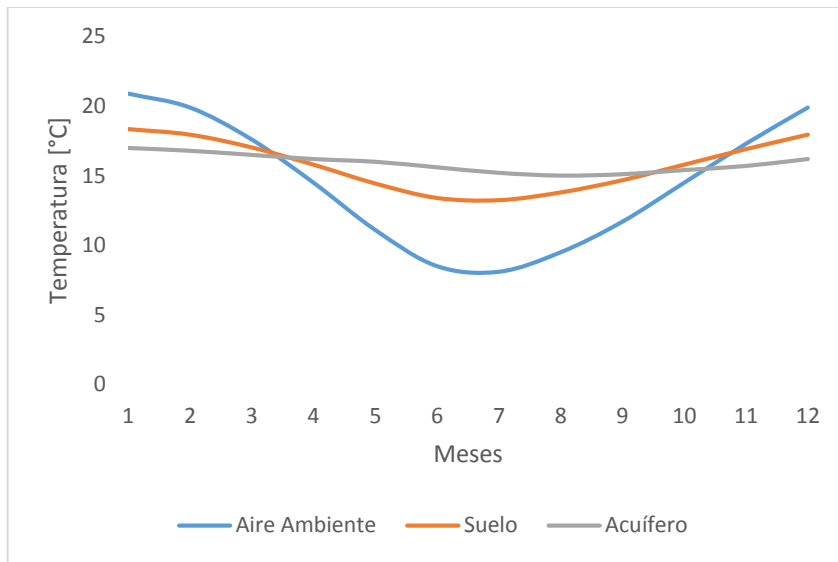


Figura 2-2: Temperatura mensual promedio típica en Santiago. Fuente: Elaboración propia.

Geotermia de muy baja entalpía se refiere al estudio, ocurrencia y explotación del calor de baja temperatura, menores a 30°C, que se encuentra normalmente en el subsuelo a una profundidad relativamente somera, típicamente menor a 200 m. Esta fuente energética se ha denominado también geotermia somera, geotermia de baja o muy baja entalpía, termogeología, energía geotérmica de baja intensidad, e incluso geotermia solar, geointercambio, o bomba de calor conectada al terreno o de fuente subterránea.

La Figura 2-3 muestra los distintos usos de la energía geotérmica de baja entalpía según la temperatura del recurso.

Una bomba de calor geotérmica, o GSHP por las siglas en inglés de *Ground-Source Heat Pump*, transforma esta energía de la tierra en energía útil para climatizar espacios. Provee calor de baja temperatura al extraerla desde una fuente fría, como un acuífero subterráneo, y también es capaz de enfriar al invertir este proceso.

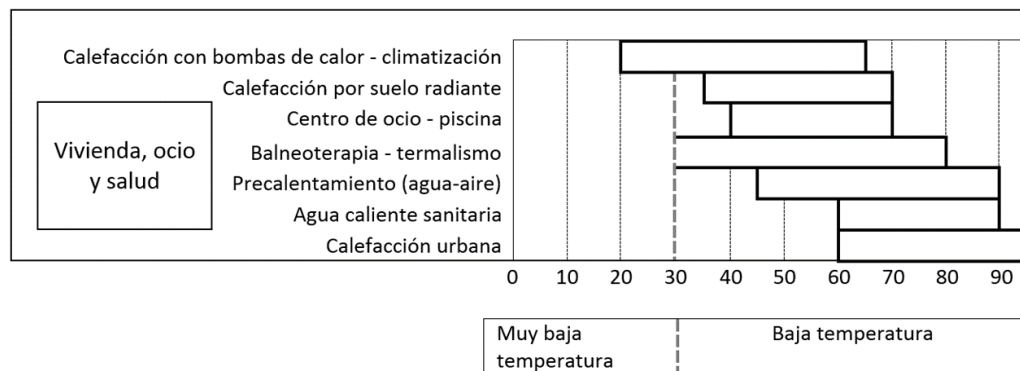


Figura 2-3: Usos de la energía geotérmica según la temperatura del recurso. Fuente: Adaptado de [7].

2.2. Sistema de Bomba de Calor Geotérmica

Una bomba de calor opera con un compresor que provee el trabajo necesario para concentrar o disipar calor. Posteriormente, el calor se distribuye a un edificio por medio de sistemas de climatización convencionales, como losas radiantes o *fan coils*. Esta tecnología opera tal como lo hace un refrigerador o un sistema de aire acondicionado convencional, en el sentido de que requiere una fuente externa –típicamente electricidad– para concentrar el calor o desplazar la temperatura. Típicamente, cada watt (W) de electricidad usada para operar un sistema GSHP genera entre 3 y 6 [W] termales de energía [8]. Las bombas de calor poseen un rango típico de capacidad de enfriamiento que va desde los 3,5 a 35 kW (cerca de 1 a 10 toneladas de refrigeración), y una sola unidad es generalmente suficiente para climatizar una casa o un pequeño edificio comercial. Para edificios comerciales grandes, instituciones o industrias se emplean múltiples unidades conectadas a un ciclo de fluido común.

Debido a que un sistema GSHP es capaz de extraer energía desde el suelo, la energía transferida al espacio habitable es mayor que el consumo de energía en el compresor. En efecto, la eficiencia de estos sistemas promedia entre 200 y 500%. Una bomba de calor geotérmica es más estable que una bomba de calor de aire, la cual intercambia calor con el aire exterior, debido a la temperatura estable y moderada de la tierra. También son más eficientes que las tecnologías convencionales de calefacción y aire acondicionado, y también tienen menores costos de mantención [6].

En consecuencia, se pueden lograr ahorros considerables en energía por el uso de sistemas GSHP en vez de sistemas convencionales de climatización. Se puede disminuir el consumo de energía de un 30% a 70% en calefacción, y de un 20% a 50% en enfriar; e incluso más si se compara con sistemas de calefacción por combustión o calefactores eléctricos [6].

Un sistema de bomba de calor geotérmico posee tres componentes principales: una bomba de calor, un intercambiador de calor subterráneo y un sistema de distribución. A continuación se describen estos componentes principales.

2.2.1. Bomba de Calor

Una bomba de calor transfiere el calor entre el sistema de distribución de calefacción/enfriamiento y el intercambiador de calor subterráneo. Es la unidad básica de un sistema GSHP.

Una bomba de calor opera usando el mismo ciclo termodinámico que un refrigerador. La bomba de calor utiliza la compresión y expansión de un fluido de trabajo para dirigir el flujo de calor entre el ambiente interno del edificio y el intercambiador de calor subterráneo. De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, el calor fluye sólo hacia donde hay menor temperatura. Sin embargo, una bomba de calor es capaz de extraer

calor de la tierra a una temperatura de, por ejemplo, 15°C, y utilizarla para calentar un ambiente a 18°C.

Para explicar el funcionamiento de una bomba de calor se hará referencia a la Figura 2-4. En modo de calefacción, la bomba de calor trabaja de la siguiente manera:

- 1-2: El calor proveniente de la fuente geotermal se transfiere al fluido de trabajo por medio de un intercambiador de calor llamado evaporador. Este fluido de trabajo es un refrigerante que se encuentra en estado líquido saturado y a una temperatura más fría que la fuente geotermal de forma que existe un flujo de calor hacia él. Este calor evapora y sobrecalienta al refrigerante, aumentando ligeramente su temperatura.
- 2-3: Luego, el fluido de trabajo en estado gaseoso, con baja presión y temperatura pasa por un compresor eléctrico. Este aumenta la presión del refrigerante, y en consecuencia, sube su temperatura. Este nuevo producto es el fluido de servicio para un segundo intercambiador de calor, llamado condensador.
- 3-4: El aire que distribuirá el calor hacia el edificio fluye por el condensador. Debido a que el fluido de trabajo se encuentra a una temperatura mayor que el aire al interior de la habitación, este transfiere su calor hacia él. A medida que el fluido de trabajo pierde calor se condensa.
- 4-1: El fluido de trabajo líquido con alta presión y temperatura luego pasa por una válvula de expansión. La válvula reduce la presión del fluido de trabajo, y en consecuencia, su temperatura baja. Ahora, este líquido de baja temperatura y presión fluye hacia el evaporador, cerrando y comenzando nuevamente el ciclo.

Es de esta manera como el calor proveniente de la fuente geotermal es transferida hacia el aire al interior del edificio.

Una diferencia importante entre una bomba de calor y un refrigerador es que un sistema GSHP puede ser reversible. Esto es, cuando se quiere enfriar un ambiente, el intercambiador de calor entre el fluido de trabajo y la fuente geotermal adopta el rol de condensador, y el intercambiador de calor entre el fluido de trabajo y el aire interior se transforma en evaporador. Esto se logra por medio de una válvula reversible en la bomba de calor (Figura 2-4).

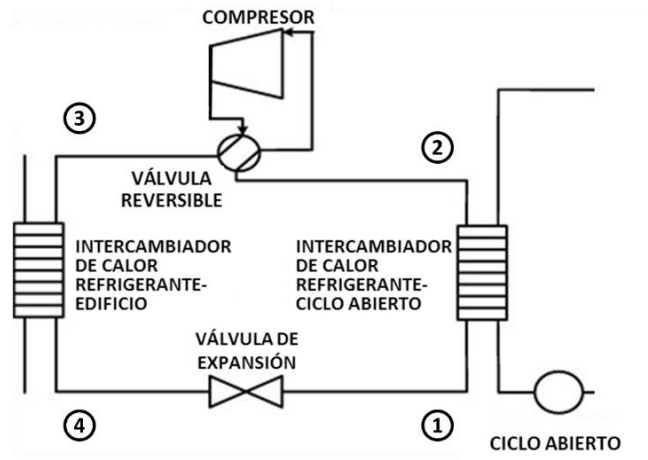


Figura 2-4: Ciclo termodinámico de una bomba de calor típica. Fuente: Adaptado de [8].

La eficiencia de la bomba de calor, COP , es el cociente entre la energía que se desea conseguir, $Q_{condensador}$ en invierno y $Q_{evaporador}$ en verano, y la energía que se debe aportar en el compresor para conseguirlo, W :

$$COP_c = \frac{Q_{condensador}}{W} \quad (2-1)$$

$$COP_r = \frac{Q_{evaporador}}{W} \quad (2-2)$$

En general, por cada unidad de energía eléctrica usada en una bomba de calor, se producen de 3 a 6 unidades de energía térmica [8].

2.2.2. Intercambiador de Calor Subterráneo

El intercambiador de calor subterráneo es donde sucede la transferencia de calor entre el suelo y el sistema GSHP. Un sistema GSHP considera una gran variedad de sistemas que pueden ser suelos sin agua, acuíferos saturados de agua subterránea, o aguas superficiales. Todos estos medios pueden funcionar como fuente o sumidero de calor. Se pueden definir dos tipos de intercambiadores de calor subterráneos: ciclo abierto y ciclo cerrado. Los ciclos cerrados consisten en un arreglo de tuberías cerradas horizontales o verticales, por las cuales circula un fluido (habitualmente agua con anticongelante) que intercambia calor con el subsuelo, lagos o ríos, y posteriormente intercambia este calor con la bomba de calor. Por otro lado, los ciclos abiertos consisten en extraer agua de acuíferos subterráneos, lagos o ríos, la cual intercambia calor con la bomba de calor, y posteriormente se reinyecta al medio desde donde fue extraída.

La siguiente nomenclatura fue adoptada por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) para distinguir los distintos tipos de conexiones a tierra en sistemas GSHP.

- Bombas de Calor Acopladas al Suelo (GCHPs), que utilizan el suelo como fuente y sumidero de calor, por medio de un intercambiador de calor cerrado horizontal o vertical.
- Bombas de Calor de Acuífero (GWHPs), que usan un acuífero como fuente y sumidero de calor.
- Bombas de Calor de Agua Superficial (SWHPs), que usan masas de agua superficiales, como ríos o lagos, como fuente y sumidero de calor.

Debido a que todos los sistemas de conexión a tierra en un sistema GSHP son de muy difícil acceso una vez ya instalados, los materiales y mano de obra contratados en su construcción deben ser del más alto nivel.

Dada la alta potencia térmica que se requiere para este proyecto, esta memoria aborda en detalle solo la solución pertinente de un sistema de Bomba de Calor de Acuífero [8].

2.2.2.1. Bomba de Calor de Acuífero

También llamada GWHP, por las siglas en inglés de *Groundwater Heat Pump*, es un sistema de ciclo abierto que consiste en un conjunto de pozos de extracción de agua subterránea desde un acuífero, que utiliza como fluido de transferencia de calor y transporta hacia un arreglo de bombas de calor o también hacia un intercambiador intermedio. El intercambiador intermedio transfiere el calor desde el ciclo abierto de agua subterránea hacia el circuito cerrado de la bomba de calor en el edificio. De esta manera, aísla la bomba de calor de los pozos de agua, protegiéndola de la precipitación de minerales y de la corrosión. El ciclo del agua subterránea se denomina abierto porque el agua es luego reinyectada al mismo acuífero por medio de un segundo conjunto de pozos de reinyección.

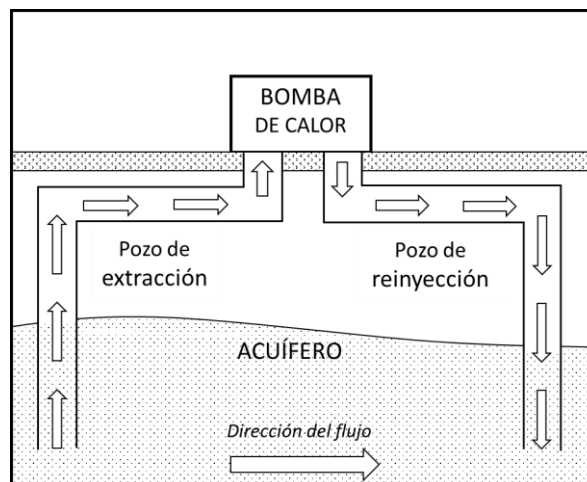


Figura 2-5: Ciclo abierto de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia.

2.3. San Alberto de Casas Viejas

Este es un proyecto de urbanización ubicado en la comuna de Puente Alto, sector de Casas Viejas, junto al Río Maipo. Comprende la construcción de 2088 casas, las que se construyeron entre los años 2007 y 2008. La Figura 2-6 representa una vista aérea de la localización del proyecto.

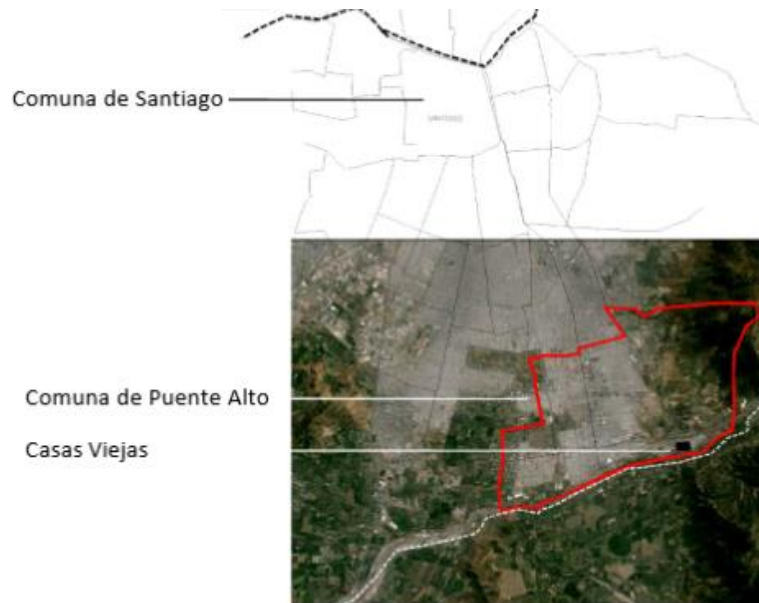


Figura 2-6: Vista aérea emplazamiento. Fuente: [10].

La Figura 2-7 representa un plano del proyecto total, en que se especifica la distribución de las viviendas según su superficie (45, 50, 56 y 61 m²) y también se presentan imágenes de las viviendas sociales para familias con acceso al Fondo Solidario de Vivienda (FSV) y de las viviendas económicas para familias con acceso al subsidio D.S.40 del Ministerio de la Vivienda.

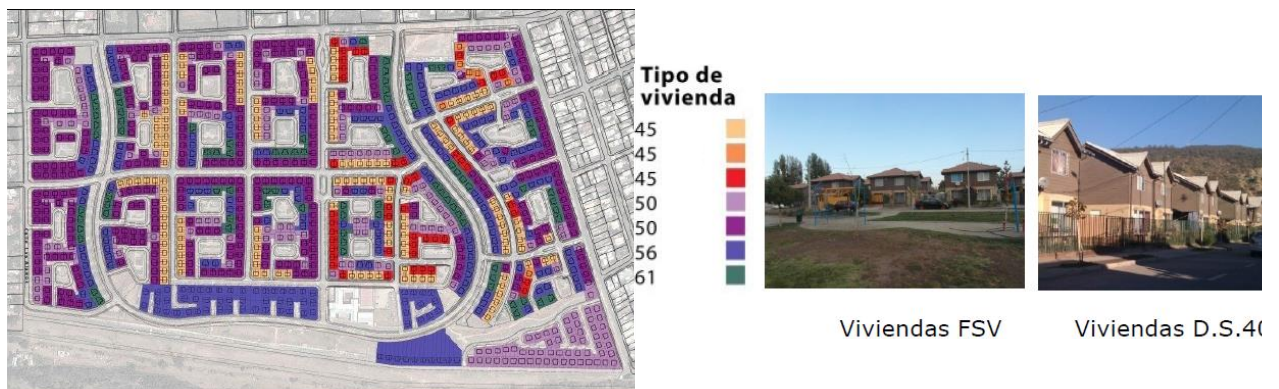


Figura 2-7: Plano y tipología de viviendas del proyecto San Alberto de Casas Viejas. Fuente: [11].

La Tabla 2-1 presenta las especificaciones técnicas de las viviendas, las cuales servirán para determinar la envolvente térmica de las viviendas y la demanda energética para calefacción y refrigeración de los ambientes.

Tabla 2-1: Especificaciones técnicas según tipología.

Especificaciones Técnicas según tipología		45-FSV I	45-FSV II	50- FSV II	50- DS 40	56- DS 40	61- DS 40
Obra Gruesa	Albañilería armada primer piso	Ladrillo hecho a máquina tipo SantiagoTE					
	Tabiques segundo piso	Madera estructural impregnada					
	Cubierta de techumbre	Plancha fibrocemento	Teja de cemento gris			Teja de Cemento con color	
	Aislación en tabique ext. 2° p	Lana mineral o Aislapol					
Revestimientos	Revestimiento Tabiques ext. 2ºp	Plancha fibrocemento texturada					fibrocemento pintado
	Cielo en Losa		Pintura texturada			látex	Grano fino
	Pavimento Estar - Comedor	Radier afinado	Cerámica línea económica				cerámica
	Pavimento Dormitorios y circulaciones 2º piso	Losa de hormigón afinada	Cubrepiso				Alfombra
	Pavimento Baño y cocina		Cerámica línea económica			cerámica	
Puertas y ventanas	Puerta acceso	Estructura de pino con revestimiento para ext.				MDF-HR 4mm pre-pintada	
	Puertas interiores	2 Puertas lisas tipo Placarol				MDF 4 mm lisa, pre-pintada, pre-colgada	
	Puerta cocina exterior	Estructura de pino con revestimiento para ext.				Lisa pintada	
	Ventanas	Aluminio línea económica					

Fuente: [15].

2.4. Geotermia en Chile

Con respecto al potencial geotérmico que posee Chile, el país se encuentra en el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, convirtiéndolo en una de las regiones con mayor actividad volcánica del planeta, con cerca de un 20% de los volcanes activos continentales [12]. Actualmente se habla de un potencial energético que va desde los

3.350 MW [12] hasta los 16.000 MW [13], pudiendo representar un 91% de la capacidad instalada actual de la matriz energética de generación del país.

Los recursos geotérmicos se pueden clasificar en tres categorías de acuerdo a la energía contenida en un reservorio, que a su vez se asocia al nivel de temperatura que presenta. Se le llama geotermia de alta entalpía a aquella con temperaturas mayores a 150°C; le siguen los recursos de media entalpía, con temperaturas entre 90°C y 150°C; y finalmente los de baja entalpía, que tienen temperaturas menores a 90°C. El aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía representa el uso más popular de geotermia en el mundo y permite usar este recurso de forma directa o asistida por bombas de calor, aplicándose principalmente a la calefacción industrial y domiciliaria, desarrollo de la horticultura, acuicultura y turismo, entre muchos otros usos [12].

Aunque la energía geotérmica aproveche el calor interno de la tierra y generalmente se asocia a la presencia de volcanes, esta no es la única característica que la hace una fuente de energía útil y confiable. El uso directo de geotermia de baja entalpía se caracteriza por aprovechar la baja variabilidad térmica del subsuelo que, gracias a su baja difusividad térmica y aislación de la temperatura ambiente estacional, permite almacenar energía para ser luego aprovechada en la superficie durante todo el año, como por ejemplo, en las grandes bodegas de vino que suelen estar en profundidad, ya que son más frescas en verano y más templadas en invierno. Más aun, en la zona central de la Cordillera de Los Andes existe un “intervalo volcánico” con ausencia de volcanismo cuaternario que genera un área de escasas fuentes termales de alta temperatura. Sin embargo, esto no significa que una ciudad como Santiago quede marginada del desarrollo y los beneficios de la energía geotérmica. Por el contrario, la presencia de acuíferos subterráneos con gradientes hidráulicos favorables, beneficiados por los flujos de agua subterránea proveniente de la cordillera, y un relleno sedimentario permeable con alta conductividad hidráulica [14], hacen esta zona muy propicia para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas.

Las bombas de calor geotérmicas constituyen una tecnología muy eficiente y amigable con el medio ambiente, que en la práctica produce una disminución de las emisiones de CO₂ y que reduce la contaminación ambiental [4]. Además, a diferencia de otras fuentes renovables no convencionales de energía, las bombas de calor geotérmicas poseen una disponibilidad permanente, pues se benefician de la ya mencionada baja variabilidad térmica del sub-suelo. Por otro lado, alternativas como la energía solar o eólica se ven afectadas por los cambios temporales de radiación y viento respectivamente. Por último, es una fuente de energía presente a lo largo de todo el territorio nacional.

Para el final del 2014, el uso directo de la geotermia se extiende en 82 países, incluido Chile, con una capacidad total instalada mundial de más de 70 mil MWt (45% más que en el año 2010) [16]. Este abarca ámbitos tan diversos como la calefacción distrital, aplicaciones en invernaderos, secaderos de alimentos y maderas, usos industriales, acuicultura y agricultura.

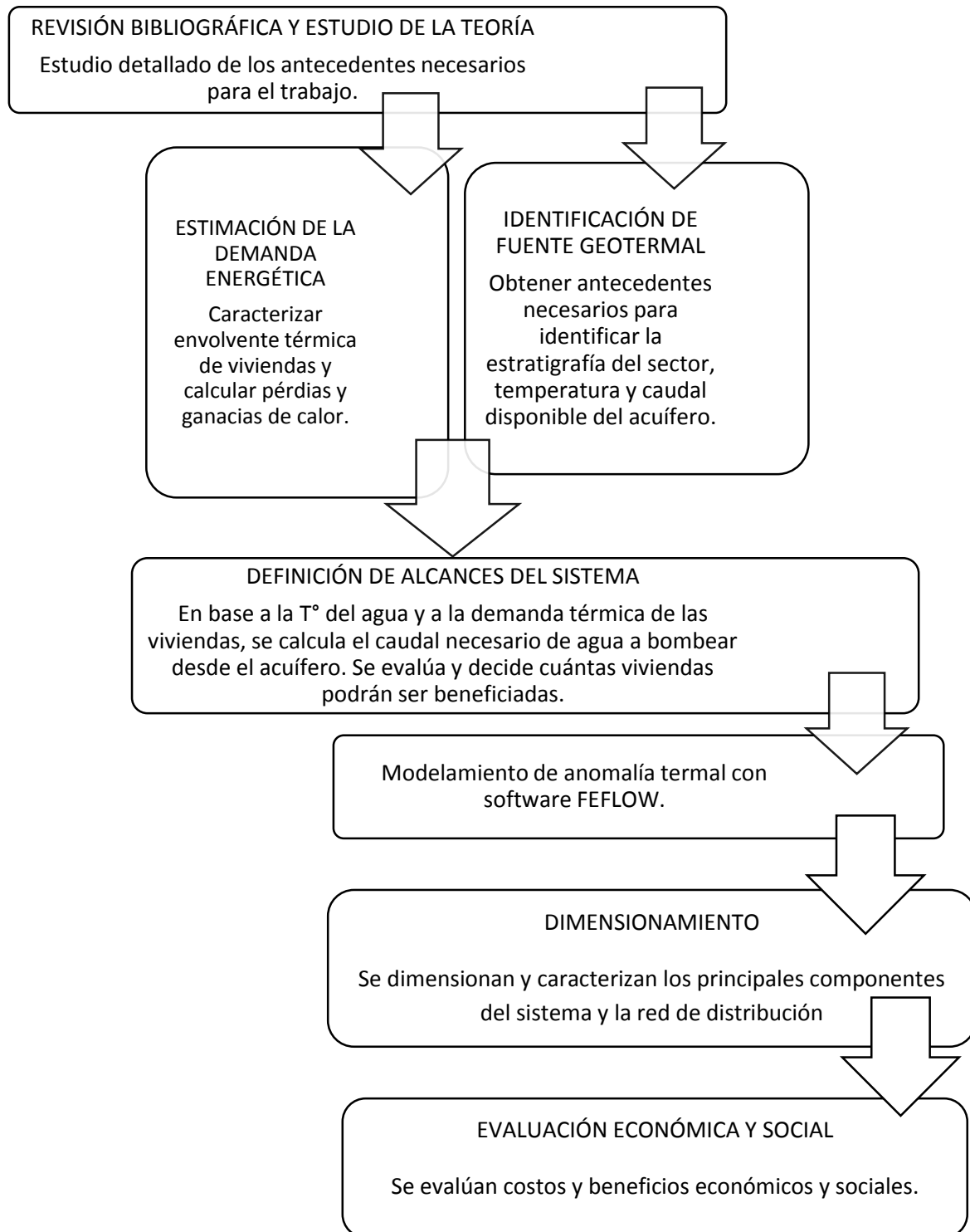
En Chile, la capacidad instalada del uso directo de geotermia alcanza los 19,91 MWt, lo que representa entre un 0,1% y 0,6% de la capacidad potencial, de acuerdo a las estimaciones disponibles [16]. Otros países comparables con Chile en términos de población son Rumania, con una capacidad instalada de 245,13 MWt, y Holanda, con 790 MWt. Por otro lado, al considerar países con un PIB per cápita similares al de Chile, se encuentran Lituania con una capacidad instalada de 94,6 MWt, y Croacia con 79,94 MWt [16]. Con respecto a todos los casos anteriores, Chile posee un déficit de aprovechamiento directo de energía geotérmica.

En el sitio web del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes de la Universidad de Chile [17] se pueden encontrar ejemplos de proyectos que usan geotermia de baja entalpía en Chile. Algunos de estos son:

- Viña Maquis, en Palmilla, que se convirtió en el primer viñedo del país en usar bombas de calor geotérmicas para el control, transferencia y acumulación de energía, y que ha demostrado ser tres veces más eficiente que los métodos de calefacción y enfriamiento tradicionales (inversión: \$222 millones de pesos).
- Escuela rural Linares de Casma, en Frutillar, que reemplazó su antiguo sistema de calefacción en base a leña por bombas de calor geotérmicas que además mantienen el sistema de agua caliente sanitaria de su internado (recuperación de inversión: 2 años).
- Termas Puyehue Wellness & Spa Resort, que desarrolló un proyecto de energía geotérmica que le permitió aprovechar las aguas termales para calefaccionar las habitaciones y agua caliente sanitaria, reduciendo el consumo de combustible fósil en un 75% del 2010 a la fecha (inversión: \$200 millones de pesos; ahorro anual de combustibles fósiles: \$85 millones anuales, 130.000 litros de diésel y 45 litros de gas al año; recuperación de inversión: 3 años).
- En Santiago, las torres del Parque Titanium utilizarán aguas subterráneas, que son parte del caudal que transporta el río Mapocho, para climatizar las oficinas de cada una de estas torres.

3. Metodología

La metodología propuesta se presenta en el siguiente esquema:



4. Dimensionamiento y Resultados

A continuación se presenta el desarrollo del dimensionamiento del sistema y los resultados.

4.1. Cálculo de Cargas Térmicas

Para determinar la carga térmica del proyecto y el suministro de agua del acuífero necesario se utiliza el modelo teórico basado en el manual *Ground-Source Heat Pump Project Analysis* del *RETScreen Engineering & Cases Textbook* [6].

En primer lugar, es difícil evaluar el comportamiento interno de un edificio en un sentido más complejo, entendido como distintas zonas interiores con demandas individuales. Un enfoque más simple considera al edificio como un solo bloque, permitiendo así el cálculo de lo que se llama “carga por bloque” [6].

La carga por bloque se refiere a la carga térmica punta que imprime un edificio en algún momento específico bajo condiciones de temperatura de diseño. Para edificios residenciales, las cargas térmicas por bloque de calefacción y refrigeración son generalmente la suma de las cargas de todas las habitaciones bajo las mismas condiciones de diseño. La Figura 4-1 (a) representa el enfoque de carga por bloque, mientras que la Figura 4-1 (b) muestra cómo un edificio es típicamente segmentado en zonas con diferentes perfiles de cargas térmicas. Al utilizar la carga por bloque, todo el edificio puede ser tratado como una zona única con una sola temperatura del aire interno.

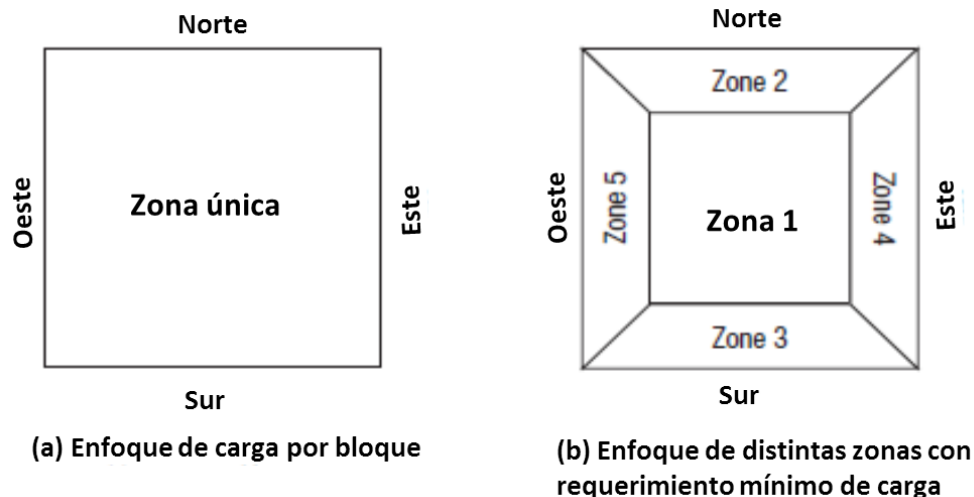


Figura 4-1: Carga por bloque vs. Distinción zonal. Fuente: Adaptado de [6].

En el caso particular del proyecto San Alberto de Casas Viejas, es conveniente utilizar este enfoque simple, debido a la gran escala del proyecto y a que la contribución detallada de una sola vivienda no tendrá mayores efectos en el orden de magnitud de la carga

térmica de todo el conjunto. Para hacer aún más práctico este análisis, al tratarse de casas pareadas, se considerará cada par de casas como un solo bloque.

Para calcular las cargas térmicas de verano (enfriamiento) e invierno (calefacción), se identifican los siguientes componentes, representados en la Figura 4-2:

- Pérdidas por transmisión (conductiva y convectiva).
- Ganancias solares (sensibles).
- Cargas por ventilación (latente y sensible).
- Ganancias internas por equipos (latentes y sensibles).
- Cargas por personas (latente y sensible).

Los componentes sensibles se refieren a la capacidad necesaria para mantener la temperatura del aire al interior de la vivienda, mientras que los componentes latentes hacen referencia a la capacidad requerida para mantener la humedad en el aire al interior de la vivienda.

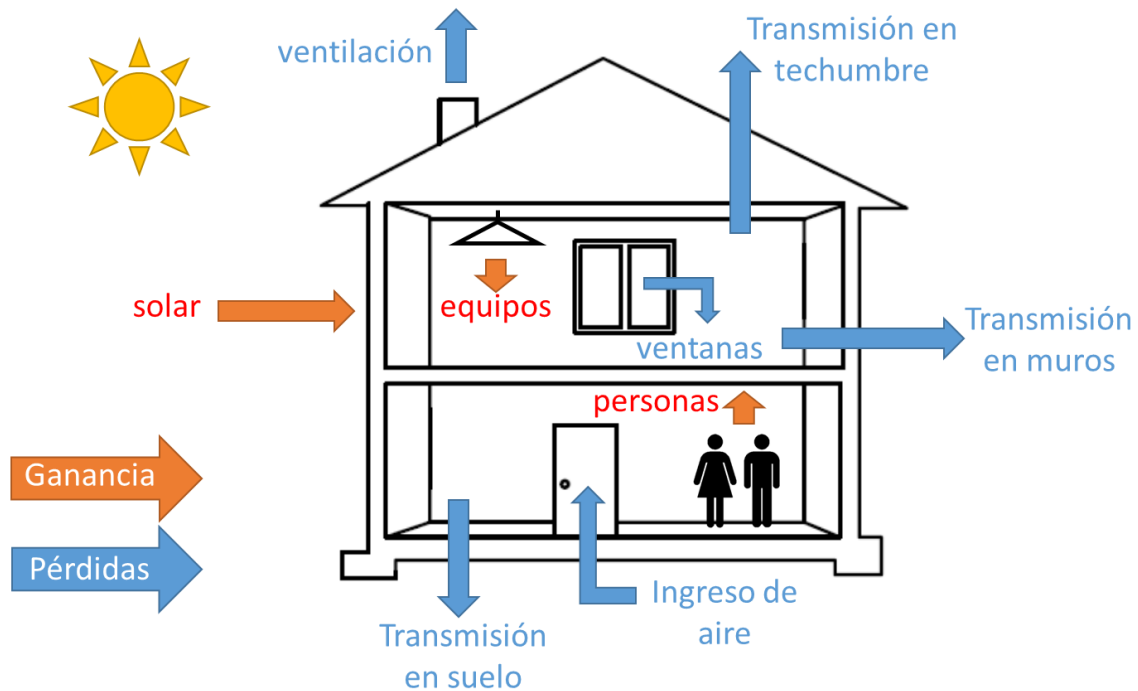


Figura 4-2: Componentes de Cargas Térmicas. Fuente: Elaboración propia.

Estos se agrupan, según el modelo, en seis componentes indexados como RES_i , con i de 1 a 6, que serán detallados a partir del capítulo subsiguiente. Las cargas térmicas generadas en cada una de estas componentes pueden ser expresadas en función de la temperatura del aire exterior, i.e. $q_i = q_i(T_o)$, y entonces la carga térmica global sería:

$$Q = \sum_i q_i(T_o) \quad (4-1)$$

Antes, es necesario determinar los parámetros estadísticos de clima necesarios para definir las condiciones de temperatura de diseño del sistema.

4.1.1. Modelo de Clima para Santiago

En primer lugar se definen las temperaturas de diseño del aire al interior de las viviendas con tal de asegurar un confort térmico en las estaciones de verano e invierno. Según un estudio realizado por el Programa País Eficiencia Energética (PPEE) y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH [18], el 80% de las viviendas en Santiago poseen una temperatura interior menor a 17°C en invierno, y un 94% poseen una temperatura interior mayor a 25°C en verano. De esta manera, se definen las temperaturas de diseño en 18°C en invierno, y en 23°C en verano. Cabe destacar que basta una diferencia de pocos grados entre la temperatura del aire al interior y el exterior de las viviendas para generar una condición de confort térmico.

Por otra parte, para caracterizar el clima de la zona donde se encuentra emplazado el proyecto y determinar los parámetros de temperatura de diseño necesarios para calcular la carga térmica de las viviendas, se utiliza la base de datos estadísticos para la ciudad de Santiago obtenidos del software EnergyPlus del Departamento de Energía del Gobierno de los Estados Unidos [19]. Estos datos estadísticos se presentan a continuación en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1: Datos estadísticos de clima para Santiago.

Referencia	CHL_Santiago.855740_IWEC	-
Localidad	SANTIAGO - CHL	-
Latitud	{S 33° 22'}	-
Longitud	{W 70° 46'}	-
Elevación sobre el nivel del mar	476	[m]
Presión atmosférica estándar	95736	[Pa]
Fuente de los datos	IWEC Data	-
Estación WMO	855740	-
Temperatura de diseño para calefacción 99%	0	[°C]
Temperatura de diseño para refrigeración 1%	30,7	[°C]

Fuente: [19].

4.1.2. RES₁ – Pérdidas por Transmisión (Conductivas y Convectivas)

Las pérdidas por transmisión incluyen todas las pérdidas de calor por conducción y convección a través de la envolvente de la vivienda. La ecuación que rige estas pérdidas de calor por transmisión es la ecuación (4-2).

$$q_{trans} = \sum_i (UA)_i (T_o - T_{in}) \quad (4-2)$$

Donde $(UA)_i$ es el coeficiente global de transferencia de calor del componente i de la envolvente (muros exteriores, techo, ventanas y suelo) y T_{in} es la temperatura del aire al interior de la casa.

Para simplificar los cálculos, el modelo además asume que el perímetro total de la vivienda se distribuye en un cuadrado, o sea que todos los lados miden lo mismo. De esta manera, el perímetro de una planta de la casa se calcula como $4\sqrt{S_j}$, donde S_j es el área total de la planta j . Definiéndose además la altura H_j del muro y área total de ventanas AG_j , (UA) se calcula como:

$$(UA)_{muro,j} = U_{muro,j} (4H_j \sqrt{S_j} - AG_j) \quad (4-3)$$

Donde $U_{muro,j}$ es el coeficiente de transferencia de calor para los muros exteriores, el cual depende del tipo de aislación y material que se utilice.

Para el techo, el área considerada es igual al área de la segunda planta de la vivienda. Esto genera la siguiente expresión para (UA) :

$$(UA)_{techo} = U_{techo} S_{segundo\ piso} \quad (4-4)$$

Aquí, U_{techo} es el valor promedio de U para el techo.

El coeficiente de pérdida a través de las ventanas se expresa como:

$$(UA)_{ventana} = U_{ventana} AG \quad (4-5)$$

El valor de $U_{ventana}$ para una ventana estándar de vidrio monolítico, sin espaciador y un marco de metal (aluminio) sin ruptura de puente térmico es 5,8 [W/(m²K)], según DECONUC [20].

Finalmente, para el caso de las pérdidas por el piso en contacto con el terreno el cálculo es distinto. Aquí se considera una transmitancia térmica lineal (K_l) y el perímetro exterior de la construcción:

$$(UA)_{piso} = K_l \times 4 \sqrt{S_{primer\ piso}} \quad (4-6)$$

El cálculo de la transmitancia térmica lineal se rige por lo indicado en la NCh 853 [21] y es igual 1,2 [W/(mK)].

Los valores de U se calculan en base a las materialidades de la envolvente térmica, y su detalle se adjunta en el Anexo A. No obstante, existe una reglamentación térmica vigente desde el año 2007 que regula los valores de U según la zona térmica geográfica [22]. Para Santiago, los valores de U son 1,9 [W/m²K] para muros y 0,47 [W/m²K] para techos.

A continuación se presenta la Tabla 4-2 que resume los cálculos de las pérdidas por transmisión de cada tipología de vivienda.

Tabla 4-2: Resumen cálculo de Pérdidas por transmisión

Componente	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	
Paredes					m ²
Coeficiente de transferencia térmica 1 piso	2,10	2,10	2,10	2,10	W/(m ² K)
Coeficiente de transferencia térmica 2 piso	0,82	0,82	0,82	0,82	W/(m ² K)
Superficie primer piso	41,1	45,4	52,9	54,1	m ²
Superficie segundo piso	42,8	47,2	51,4	59,2	m ²
Altura muro primer piso	2,36	2,36	2,36	2,36	m
Altura muro segundo piso	2,36	2,36	2,36	2,36	m
Área total ventanas primer piso	7,3	7,9	15,4	15,4	m ²
Área total ventanas segundo piso	6,7	7,8	8,0	8,7	m ²
$(UA)_{muro}$ primer piso	112	117	112	113	W/K
$(UA)_{muro}$ segundo piso	45	47	49	52	W/K
Techo					
Coeficiente de transferencia térmica	0,76	0,76	0,76	0,76	W/(m ² K)
$(UA)_{techo}$	33	33	33	33	W/K
Ventanas					
Coeficiente de transferencia térmica	5,8	5,8	5,8	5,8	W/(m ² K)
$(UA)_{ventana}$	81	91	136	140	W/K
Piso					
Coeficiente de transferencia térmica lineal	1,2	1,2	1,2	1,2	W/(mK)
$(UA)_{piso}$	31	32	35	35	W/K
Perdida por transmisión total invierno	-5,4	-5,8	-6,7	-6,9	kW
Perdida por transmisión total verano	2,3	2,5	2,9	3,0	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.RES₂ – Ganancias Solares (Sensibles)

El modelo asume que existe una relación lineal entre la temperatura exterior y la cantidad de ganancia por radiación solar en el edificio, expresada de la siguiente manera:

$$q_{sol} = S_c [q_{sol,inv} + M(T_o - T_{ph})] \quad (4-7)$$

Donde S_c representa la superficie total acondicionada de la vivienda, y M es un coeficiente de interpolación de ganancia de calor por irradiación, expresado como:

$$M = \frac{q_{sol,ver} - q_{sol,inv}}{(T_{pr} - T_{pc})} \quad (4-8)$$

Donde $q_{sol,inv}$ y $q_{sol,ver}$ son las contribuciones solares promedio sobre el edificio para invierno y verano respectivamente, y T_{pc} y T_{pr} son las temperaturas promedio diarias de diseño de invierno (calefacción) y verano (refrigeración). Estas temperaturas se obtienen de las temperaturas diarias de diseño para calefacción y refrigeración $T_{d,cal}$ y $T_{d,ref}$:

$$T_{pr} = T_{d,ref} - DR/2 \quad (4-9)$$

$$T_{pc} = T_{d,cal} + DR/2 \quad (4-10)$$

Donde DR es la amplitud promedio de temperatura diaria. Luego, el cálculo de las ganancias solares promedio para invierno y verano se basa en el método de *Cooling Load Factor (CLF)* de la ASHRAE [23], y se expresa de la siguiente forma:

$$q_{estación} = \frac{1}{nh_{estación} S_c} \sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} AG_{ori} SC_{ori} CLF_{tot,ori} FPS_{estación}) \quad (4-11)$$

Donde ori es la orientación (Norte, Este Sour, Oeste), $estación$ corresponde a invierno o verano, $MSHGF_{ori,estación}$ es la máxima ganancia solar según orientación y estación a la latitud de la vivienda, AG_{ori} es el área de ventanas expuesto en la orientación ori , SC_{ori} es el coeficiente de sombra sobre ventanas en cada orientación, FPS_{season} es la fracción de posible luz solar para cada estación, $nh_{estación}$ es el número de horas de operación del equipo de aire acondicionado en cada estación, y S_c es nuevamente la superficie total acondicionada de la vivienda.

Según la ASHRAE [23] se pueden asumir ciertos valores típicos para los siguientes parámetros: $SC_{ori} = 0,81$, $FPS_{verano} = 0,64$ y $FPS_{invierno} = 0,45$. Se considera además que $nh_{estación}$ es 6 [h] para verano y 12 [h] para invierno. Finalmente, se asume que el área de las ventanas se distribuye de igual manera en todas las orientaciones de la casa, y por lo tanto AG_{ori} correspondería a un cuarto del área total AG en cada orientación. Esta suposición es conveniente debido a que el proyecto involucra una gran cantidad de viviendas (2088), orientadas en todos los sentidos. En consecuencia, es posible factorizar las constantes de la ecuación (4-11) y obtener:

$$q_{estación} = \frac{AG SC_{ori} FPS_{estación}}{4 nh_{estación} S_c} \sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} CLF_{tot,ori}) \quad (4-12)$$

Los valores para $MSHGF_{ori,estación}$ están tabulados en el Ch. 26, Tabla 11 de [23]; y dependen de la orientación, mes y latitud. Los valores de $CLF_{tot,ori}$ se encuentran en la Tabla 13 de [23] y dependen solo de la orientación. Consecuentemente, la sumatoria de la ecuación (4-12) depende sólo del mes y latitud. El modelo de RETScreen propone las siguientes ecuaciones, modificadas en este caso para el hemisferio sur, que representan la sumatoria para cada estación en función de la latitud x :

$$\sum_{ori} (MSHGF_{ori} CLF_{tot,ori})_{\text{verano}} = 0,8586 x^2 + 33,9 x + 10955 \quad (4-13)$$

$$\sum_{ori} (MSHGF_{ori} CLF_{tot,ori})_{\text{invierno}} = -1,55 x^2 - 1,9687 x + 12369 \quad (4-14)$$

La Tabla 4-3 resume los cálculos de las ganancias solares:

Tabla 4-3: Resumen cálculo de ganancias solares.

Parámetro	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	
Superficie total acondicionada	83,9	92,6	104,3	113,3	m ²
Temperatura diaria de diseño para calefacción	0,0	0,0	0,0	0,0	°C
Temperatura diaria de diseño para refrigeración	30,7	30,7	30,7	30,7	°C
Amplitud promedio de temperatura diaria	14,3	14,3	14,3	14,3	°C
T° promedio diaria de diseño para calefacción	7,2	7,2	7,2	7,2	°C
T° promedio diaria de diseño para refrigeración	23,6	23,6	23,6	23,6	°C
Área total ventanas	14,0	15,7	23,4	24,1	m ²
Latitud	34	34	34	34	°
$\sum_{ori} (MSHGF_{ori} CLF_{tot,ori})_{\text{verano}}$	10,8	10,8	10,8	10,8	kJ
$\sum_{ori} (MSHGF_{ori} CLF_{tot,ori})_{\text{invierno}}$	10,7	10,7	10,7	10,7	kJ
q_{verano}	39	40	52	50	W
q_{invierno}	14	14	18	17	W
Coefficiente de interpolación de ganancia por calor por irradiación	1,54	1,57	1,9	1,8	-
Ganancia solar total invierno	0,2	0,2	0,4	0,4	kW
Ganancia solar total verano	4,2	4,7	7,0	7,2	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.RES₃ – Ganancias Internas (Sensibles)

El tratamiento de las ganancias sensibles internas es bastante sencillo y directo. Todas ellas se consideran independiente de la temperatura exterior, y en consecuencia, su expresión toma la forma de la ecuación (4-15):

$$q_{int,sens} = K_{int} + K_{p,sens} \quad (4-15)$$

Donde K_{int} son las ganancias por todo el equipamiento, luces y accesorios, y $K_{p,sens}$ representa la ganancia por personas. Las constantes en la ecuación (4-15) se asumen como 14 [W/m²] para las ganancias internas, y 74,6 [W/persona] para la ganancia por ocupantes [23]. En promedio, en las viviendas de San Alberto de Casas Viejas viven 4 personas [11], que serán consideradas como 2 adultos y 2 niños. La ganancia de calor promedio por niño se considera como la mitad que la de un adulto.

A continuación se presenta la Tabla 4-4 que resume los cálculos de las ganancias internas sensibles:

Tabla 4-4: Resumen cálculo de ganancias internas sensibles.

Parámetro	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	m ²
Ganancia sensible interna invierno	1,7	1,8	1,9	2,0	kW
Ganancia sensible interna verano	1,7	1,8	1,9	2,0	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5.RES₄ – Cargas por Ventilación (Sensibles)

La carga térmica por ventilación se divide en una componente sensible y otra latente. Para el caso de la carga sensible proveniente de una corriente de aire desde el exterior se utiliza la siguiente expresión:

$$q_{v,sens} = \rho C_p \dot{V} (T_o - T_{in}) \quad (4-16)$$

Donde ρ es la densidad del aire (igual a 1,2 [kg/m³]), C_p es el calor específico (igual a 1,005 [kJ/(kg°C)]), y \dot{V} es el flujo volumétrico de aire que entra en la vivienda.

El volumen de aire que ingresa a la vivienda por ventilación se relaciona con el número de renovaciones de aire por hora (ACH), en función del nivel de hermeticidad de la vivienda. En Chile, la normativa de hermeticidad de viviendas es deficiente [25], por lo que se considera un ACH igual a 6 [1/h], correspondiente al valor límite propuesto aceptable para la comuna de Puente Alto según el estudio “Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones” [25].

A continuación se presenta la Tabla 4-5 que resume los cálculos de las ganancias internas sensibles:

Tabla 4-5: Resumen cálculo de cargas sensibles por ventilación.

Parámetro	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	
Volumen de la vivienda	198	219	246	267	m ³
Flujo volumétrico	1188	1311	1477	1604	m ³ /h
Carga sensible ventilación invierno	-7,2	-7,9	-8,9	-9,7	kW
Carga sensible ventilación verano	3,1	3,4	3,8	4,1	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6.RES₅ – Cargas por Ventilación (Latente)

El modelo propone una evaluación básica de la carga latente por ventilación proporcional a la carga sensible por ventilación, en función del nivel de humedad promedio de la localidad de la vivienda, y linealmente relacionada a la temperatura externa de la vivienda.

En primer lugar el modelo define la fracción máxima de carga latente sobre carga sensible, según el nivel de humedad. En el caso de Santiago, se considera un nivel de humedad bajo, correspondiente a una fracción máxima, f_{max} , de 0,5. Al mismo tiempo, la fracción mínima, f_{min} , y la amplitud de temperatura promedio de diseño, DT , fueron determinadas empíricamente por el modelo en 0,1 y 30°C respectivamente.

Los valores escogidos para estas fracciones fueron obtenidos por medio del cálculo de la fracción real de carga latente sobre carga sensible para una unidad de flujo de aire, para diferentes localidades, utilizando la temperatura de bulbo seco de diseño de verano y las condiciones promedio de bulbo húmedo coincidentes en el Ch. 24, Tabla 1 de [23].

La fórmula matemática presentada por el modelo para f es:

$$f = \begin{cases} aT_o + b, & T_o > 10^\circ C \\ 0, & T_o < 10^\circ C \end{cases} \quad (4-17)$$

Donde a y b se calculan a partir de f_{max} y de la temperatura de diseño en verano $T_{d,ref}$:

$$a = \frac{f_{max} - f_{min}}{DT} \quad (4-18)$$

$$b = f_{min} - \left(\frac{T_{d,ref} - DT}{DT} \right) (f_{max} - f_{min}) \quad (4-19)$$

Finalmente, la carga latente se obtiene multiplicando la carga sensible obtenida por la ecuación (4-16) con la fracción obtenida por la ecuación (4-17).

A continuación se presenta la Tabla 4-6 que resume los cálculos de las cargas latentes por ventilación:

Tabla 4-6: Resumen cálculo de cargas latentes por ventilación.

Parámetro	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	
<i>a</i> invierno	0,000	0,000	0,000	0,000	-
<i>a</i> verano	0,013	0,013	0,013	0,013	-
<i>b</i> invierno	0,000	0,000	0,000	0,000	-
<i>b</i> verano	0,091	0,091	0,091	0,091	-
<i>f</i> invierno	0,000	0,000	0,000	0,000	-
<i>f</i> verano	0,500	0,500	0,500	0,500	-
Cargas latentes ventilación invierno	0,0	0,0	0,0	0,0	kW
Cargas latentes ventilación verano	1,5	1,7	1,9	2,1	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. RES₆ – Ganancias Internas (Latente)

El modelo solo considera la contribución interna latente de las personas. De esta forma, la expresión para esta componente es:

$$q_{int,lat} = K_{p,lat} \quad (4-20)$$

Donde $K_{p,lat}$ es una constante que describe la ganancia latente por los habitantes de la vivienda, igual a 45 [W/persona], indicado en el Ch. 30, Tabla 1 de [24]. El número de personas por vivienda ya se describió en el capítulo RES₄.

A continuación se presenta la Tabla 4-6 que resume los cálculos de las cargas latentes por ventilación:

Tabla 4-7: Resumen cálculo de ganancias internas latentes.

Parámetro	Tipología según superficie				Unidad
	45	50	56	61	
Ganancia internas latentes invierno	0,3	0,3	0,3	0,3	kW
Ganancia internas latentes verano	0,3	0,3	0,3	0,3	kW

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Resumen de Resultados

La ganancia solar (sensible) es la principal fuente de ganancia térmica al interior de las casas en verano, mientras que las pérdidas por conducción a través de la envolvente térmica es una fuente predominante de pérdida de calor en invierno. Sumado a esto, la carga térmica por ventilación (sensible) representa la segunda fuente de ganancia térmica en verano, y la principal causa de pérdida de calor en invierno. Esto último debido

a la baja calidad de hermeticidad al aire de las viviendas y al excesivo número de renovaciones de aire por hora que presentan las construcciones en el país.

La siguiente Tabla 4-8 muestra la consolidación de los resultados obtenidos en este capítulo, que corresponde a la carga térmica de todo el condominio San Alberto de Casas Viejas.

Tabla 4-8: Consolidación de resultados de cálculo de carga térmica

	Tipología según superficie				Total	Unidad
Cargas térmicas de diseño por par de viviendas	45	50	56	61	-	-
Invierno	-10,5	-11,5	-13,0	-13,9	-	kW
Verano	13,0	14,3	17,7	18,7	-	kW
Cantidad de viviendas	418	1054	448	168	2088	-
Carga térmica de diseño por todo el condominio						
invierno	-2,2	-6,0	-2,9	-1,9	-12,3	MW
verano	2,7	7,5	4,0	1,6	15,8	MW

Fuente: Elaboración propia.

Para poner estos resultados en perspectiva, un estudio de demanda energética para una vivienda de 47,7 m² desarrollado en una memoria del Departamento de Ingeniería Civil del año 2015 [26] estima una demanda promedio de calefacción en el mes de julio en -4,6 [kW]¹ para Santiago, lo que se aproxima bastante al resultado obtenido por este modelo. Por otro lado, el año 2005 el sistema de GSHP más grande del mundo correspondía a un complejo de edificios en Louisville (KY), EEUU, que consistía en la climatización de 600 habitaciones, 100 departamentos, y 89.000 metros cuadrados de oficinas, equivalentes a 161.650 [m²]. La demanda energética máxima de este proyecto equivale a 19,6 [MW] de capacidad de calefacción [6]. El proyecto de San Alberto de Casas Viejas corresponde a una superficie total de climatización de 106.856 [m²], aproximadamente un 66% del proyecto en Louisville. La demanda térmica máxima, por su lado, es de aproximadamente un 68% de la demanda del proyecto norteamericano. Esto significa que el orden de magnitud de la evaluación realizada está dentro de valores esperados, y que si bien representa un desafío no menor en la implementación de un sistema extenso de climatización, se demuestra que los sistemas GSHPs no se limitan a aplicaciones de escala pequeña.

4.1.9. Estudio de Sensibilidad

Se vuelve a calcular la carga térmica de las viviendas bajo supuestos distintos de envolvente térmica y hermeticidad al aire. El primer caso corresponde a una condición más realista, en que las renovaciones de aire por hora se consideran en 10,6 [1/h], según Bobadilla [25] para la comuna de Puente Alto (Tabla 4-9). El segundo caso (Tabla 4-10)

¹ Valor calculado como el promedio entre el caso óptimo y el caso desfavorable descritos en Bobadilla (2014) [26].

también tiene relación con la hermeticidad al aire, y evalúa la demanda térmica cuando se cumplen estándares europeos de ACH igual a 3,0 [1/h] [25]. El tercer caso es uno que asume condiciones ideales de envolvente térmica según lo reglamentado en MINVU [22] (Tabla 4-11). Por último, la Tabla 4-12 representa el caso más ideal que integra los dos escenarios anteriores.

Tabla 4-9: Carga térmica para condiciones reales de hermeticidad al aire. ACH = 10,6 [1/h] (Bobadilla, 2015) [25]

	Tipología según superficie				Total	Unidad
	45	50	56	61		
Cargas Térmicas de diseño por par de viviendas	45	50	56	61	-	-
invierno	-16,0	-17,5	-19,9	-21,4	-18.821	kW
verano	16,5	18,2	22,1	23,4	19.949	kW

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-10: Carga térmica para condiciones ideales de hermeticidad al aire. ACH = 3,0 [1/h] (Bobadilla, 2015) [25]

	Tipología según superficie				Total	Unidad
	45	50	56	61		
Cargas Térmicas de diseño por par de viviendas	45	50	56	61	-	-
invierno	-6,9	-7,5	-8,6	-9,1	-8.091	kW
verano	10,7	11,7	14,9	15,6	13.063	kW

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-11: Carga térmica para condiciones ideales de envolvente térmica.

	Tipología según superficie				Total	Unidad
	45	50	56	61		
Cargas Térmicas de diseño por par de viviendas	45	50	56	61	-	-
invierno	-9,9	-10,9	-12,6	-13,3	-11.734	kW
verano	12,8	14,3	18,3	18,6	15.700	kW

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-12: Carga térmica para condiciones ideales de envolvente térmica y hermeticidad al aire.

	Tipología según superficie				Total	Unidad
	45	50	56	61		
Cargas Térmicas de diseño por par de viviendas	45	50	56	61	-	-
invierno	-6,4	-6,9	-8,1	-8,5	-7.498	kW
verano	10,5	11,4	15,4	15,5	12.982	kW

Fuente: Elaboración propia.

Actualizar los resultados a las condiciones reales de hermeticidad aumenta la demanda térmica en más de un 50% en invierno y en torno al 26% en verano. Por otro lado, cumplir con el estándar medio de hermeticidad en Europa reduce la demanda de calor en invierno a un 66% y a un 83% en verano.

Con respecto al mejoramiento de la envolvente térmica, la demanda térmica disminuye en a lo más un 5%. Esto se debe a que las viviendas alcanzaron a atenerse a la reglamentación térmica vigente al momento de construirse. El trabajo de Bobadilla [25] propone soluciones a la permeabilidad al aire y al acondicionamiento térmico de viviendas que sirven para combatir este problema, como aislación de techos y muros, e instalación de ventanas de doble vidrio.

4.2. Cálculo de Suministro de Agua desde el Acuífero

El modelo de RETScreen también propone una forma para calcular el suministro de agua necesario que se debe bombear desde el acuífero para alimentar el sistema de bombas de calor.

4.2.1. Caudal de agua subterránea

Generalmente un sistema GSHP de ciclo abierto, como el que se propone para este proyecto, utiliza un ciclo de intercambio térmico intermedio entre el ciclo abierto del agua del acuífero y el ciclo cerrado del refrigerante en la bomba de calor. La Figura 4-3 representa esta distribución. Esto se hace para aislar el fluido de trabajo de la bomba de calor del agua subterránea, ya que de esta manera se previenen daños a los intercambiadores de calor producto de la precipitación de minerales y corrosión causada por el agua subterránea.

El criterio de dimensionamiento de un sistema GSHP de ciclo abierto es el caudal subterráneo necesario; en el sentido de que no se mide en unidades de largo de tuberías instaladas, sino que en unidades de caudal, medido en litros de agua subterránea por segundo. Este flujo está determinado por el mayor caudal necesario para las condiciones de diseño de calefacción y refrigeración, y se calcula en base a la ecuación fundamental de balance térmico:

$$\dot{m}_{cal} = \frac{Q_{d,cal}}{\rho C_p (T_{g,wi} - T_{g,wo})} \frac{(COP_c - 1)}{COP_c} \quad (4-21)$$

$$\dot{m}_{ref} = \frac{Q_{d,ref}}{\rho C_p (T_{g,wo} - T_{g,wi})} \frac{(COP_r + 1)}{COP_r} \quad (4-22)$$

Aquí, \dot{m}_{cal} y \dot{m}_{ref} son los caudales volumétricos de bombeo necesario para calefaccionar y refrigerar, $Q_{d,cal}$ y $Q_{d,ref}$ son las cargas térmicas de diseño calculadas en el capítulo 4.1, COP_c y COP_r son los coeficientes de rendimiento de la bomba de calor para calefacción y refrigeración respectivamente, ρ es la densidad del agua, C_p es la capacidad específica del agua, y $T_{g,wi}$ y $T_{g,wo}$ son las temperaturas de entrada y salida del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio.

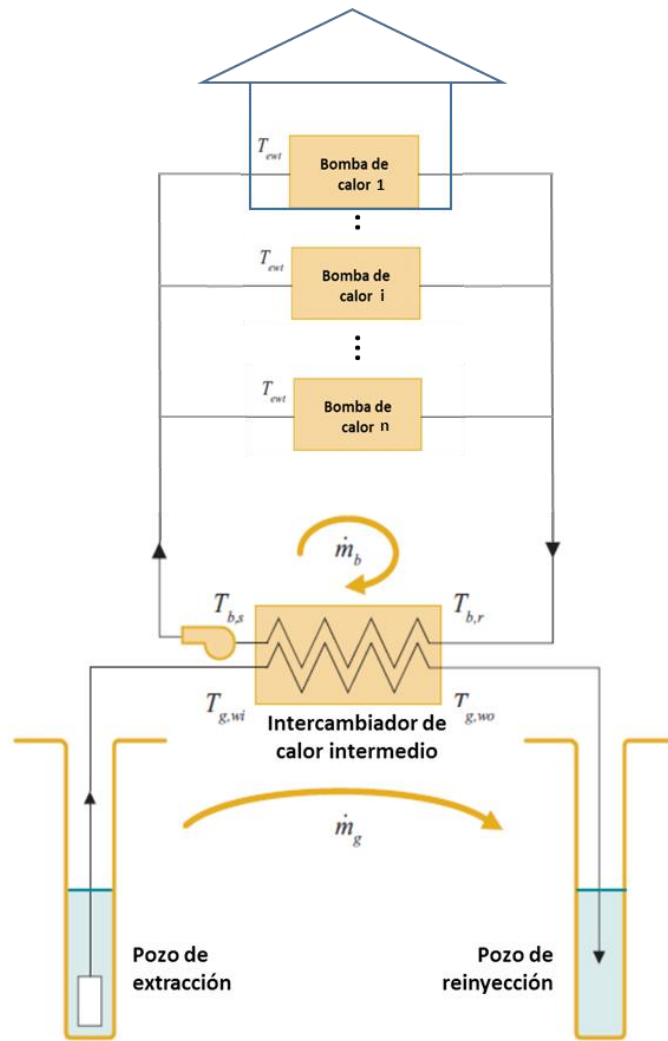


Figura 4-3: Bomba de calor geotérmica indirecta de ciclo abierto. Fuente: Adaptado de [6].

Para determinar la temperatura de salida del agua subterránea del intercambiador de calor intermedio ($T_{g,wo}$) se puede hacer mediante la selección de una temperatura de aproximación ΔT_a entre la temperatura de retorno desde la bomba de calor ($T_{b,r}$) y $T_{g,wo}$. El capítulo 6 del ASHRAE [24] indica los siguientes valores tanto para la temperatura de aproximación como para la temperatura de diseño de salida hacia la bomba de calor y entrada a la bomba de calor:

$$T_{b,s} \approx T_{ewt} = 23,9^{\circ}\text{C} \quad \text{[enfriamiento]} \quad (4-23)$$

$$T_{b,s} \approx T_{ewt} = \min(7,2^{\circ}\text{C}, \bar{T}_g - 2,8^{\circ}\text{C}) \quad \text{[calefacción]} \quad (4-24)$$

$$\Delta T_a = 2,8^{\circ}\text{C} \quad (4-25)$$

Luego, para condiciones de calefacción, $T_{g,wo}$ se calcula como:

$$T_{g,wo} = T_{b,r} + \Delta T_a \quad \text{[calefacción]} \quad (4-26)$$

Por otro lado,

$$(T_{b,s} - T_{b,r}) = \frac{Q_{ic,cal}}{\rho_b C_{p,b} \dot{m}_b} = \frac{Q_{d,cal}}{\rho_b C_{p,b} \dot{m}_b} \frac{(COP_c - 1)}{COP_c} \quad \text{[calefacción]} \quad (4-27)$$

Donde Q_{ic} es el calor transferido en el intercambiador de calor intermedio, \dot{m}_b es el flujo del fluido en el ciclo intermedio, y ρ_b y $C_{p,b}$ son la densidad y el calor específico del fluido en el ciclo intermedio. En este caso se usa agua.

Sustituyendo la ecuación (4-27) en (4-26) se obtiene:

$$T_{g,wo} = T_{b,s} - \frac{Q_{d,cal}}{\rho_b C_{p,b} \dot{m}_b} \frac{(COP_c - 1)}{COP_c} + \Delta T_a \quad \text{[calefacción]} \quad (4-28)$$

Similarmente, se obtiene $T_{g,wo}$ para la refrigeración como:

$$T_{g,wo} = T_{b,s} + \frac{Q_{d,ref}}{\rho_b C_{p,b} \dot{m}_b} \frac{(COP_r + 1)}{COP_r} - \Delta T_a \quad \text{[refrigeración]} \quad (4-29)$$

El ASHRAE [24] recomienda un valor para \dot{m}_b igual a 0,19 [l/s] por tonelada de refrigeración instalada. A su vez, los valores de operación para COP_c y COP_r se calculan como función de la temperatura de entrada a la bomba de calor (T_{ewt}) y la capacidad nominal de las bombas, de acuerdo a la aproximación propuesta por Tarnawski [6]:

$$COP_{operación} = COP_{nominal} (k_0 + k_1 T_{ewt} + k_2 T_{ewt}^2) \quad (4-30)$$

Aquí, $COP_{nominal}$ corresponde al COP de la bomba de calor medido para condiciones estándar (0°C para calefacción y 25°C para refrigeración), y k_0 , k_1 y k_2 son los coeficientes de correlación listados en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Coeficientes de correlación para polinomio cuadrático usados en la ecuación (4-30).

Coeficientes de correlación		Refrigeración	Calefacción
COP	k_0	1,53E+00	1,00E+00
	k_1	-2,30E-02	1,56E-02
	k_2	6,87E-05	-1,59E-04

Fuente: [6].

Conociendo entonces el valor de $T_{g,wo}$ es posible calcular el suministro necesario de agua subterránea con las ecuaciones (4-21) y (4-22).

4.2.2. Definición de Módulos del Sistema

Para aplicar los conceptos del capítulo 4.2.1 en el caso de estudio, se definen 16 lotes con 65 casas en promedio, y una demanda térmica promedio de 865 [kW] en invierno y 1044 [kW] en verano. La Figura 4-4 representa la distribución de los lotes en el condominio, definidos bajo criterios de espacio, según la distribución de barrios en torno a áreas verdes donde sea posible instalar los pozos.



Figura 4-4: Módulos del proyecto “San Alberto de Casas Viejas”. Fuente: Adaptado de [15].

El detalle de cada lote en cuanto a cantidad de casas, su tipología y demanda energética se puede encontrar en el Anexo B. La Tabla 4-14 muestra 4 módulos representativos que agrupan los lotes de tal manera que la desviación estándar de la demanda energética no sea mayor al 5% del promedio de la demanda del módulo.

Tabla 4-14: Módulos representativos “San Alberto de Casas Viejas” en Puente Alto.

Módulo	Lotes	Demanda promedio [kW]	Desviación estándar [kW] (%)	Estación
Módulo A	6, 8, 9 y 11	851	40 (5)	Verano
		662	33 (5)	Invierno
Módulo B	2, 14, 15 y 16	933	40 (4)	Verano
		733	27 (4)	Invierno
Módulo C	1, 4, 5 y 7	1026	19 (2)	Verano
		804	8 (1)	Invierno
Módulo D	3, 10, 12 y 13	1134	56 (5)	Verano
		883	40 (5)	Invierno

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Cálculo de caudal de agua subterránea para cada módulo

Aplicando los conceptos del capítulo 4.2.1 para el cálculo del caudal de agua subterránea en los cuatro módulos definidos en el capítulo 4.2.2, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4-15, Tabla 4-16, Tabla 4-17, Tabla 4-18 y Tabla 4-19.

Tabla 4-15: Valores comunes a todos los módulos para el cálculo de caudal de agua subterránea.

	Calefacción	Refrigeración	Unidad
Evaluación de $T_{g,wo}$			
Temperatura de aproximación entre $T_{g,wo}$ y $T_{b,r}$, ΔT_a	2,8	2,8	°C
Temperatura de salida hacia la bomba de calor, $T_{b,s}$	7,2	23,9	°C
Temperatura de entrada a la bomba de calor, T_{ewt}	7,2	23,9	°C
Densidad del fluido en ciclo intermedio, ρ_b	1000	1000	kg/m ³
Calor específico del fluido en ciclo intermedio, $C_{p,b}$	4,1813	4,1813	kJ/kg
Cálculo del suministro \dot{m}			
Coeficiente de rendimiento nominal de la bomba de calor, $COP_{nominal}$	4,13	3,13	-
Coeficiente de rendimiento de operación de la bomba de calor, $COP_{operación}$	4,56	3,20	-
Densidad del agua, ρ	1000	1000	kg/m ³
Calor específico del agua, C_p	4,1813	4,1813	kJ/(kgK)
Temperatura de entrada del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio, $T_{g,wi}$	15,0	15,0	°C

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-16: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo A.

Módulo A	Calefacción	Refrigeración	Unidad
Evaluación de $T_{g,wo}$			
Caudal del fluido en el ciclo intermedio, \dot{m}_b	35,6	45,7	l/s
Temperatura de salida del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio, $T_{g,wo}$	7,1	26,9	°C
Cálculo del suministro \dot{m}			
Capacidad energética de diseño de la bomba de calor, Q_d	662	-851	kW
Caudal de agua subterránea, \dot{m}	14,6	22,9	l/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-17: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo B.

Módulo B	Calefacción	Refrigeración	Unidad
Evaluación de $T_{g,wo}$			
Caudal del fluido en el ciclo intermedio, \dot{m}_b	39,4	50,2	l/s
Temperatura de salida del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio, $T_{g,wo}$	7,1	26,9	°C
Cálculo del suministro \dot{m}			
Capacidad energética de diseño de la bomba de calor, Q_d	733	-933	kW
Caudal de agua subterránea, \dot{m}	16,2	24,5	l/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-18: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo C.

Módulo C	Calefacción	Refrigeración	Unidad
Evaluación de $T_{g,wo}$			
Caudal del fluido en el ciclo intermedio, \dot{m}_b	43,2	55,2	l/s
Temperatura de salida del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio, $T_{g,wo}$	7,1	26,9	°C
Cálculo del suministro \dot{m}			
Capacidad energética de diseño de la bomba de calor, Q_d	804	-1026	kW
Caudal de agua subterránea, \dot{m}	17,7	27,0	l/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-19: Cálculo de caudal de agua subterránea para módulo D.

Módulo D	Calefacción	Refrigeración	Unidad
Evaluación de $T_{g,wo}$			
Caudal del fluido en el ciclo intermedio, \dot{m}_b	47,7	61,0	l/s
Temperatura de salida del agua subterránea en el intercambiador de calor intermedio, $T_{g,wo}$	7,1	26,9	°C
Cálculo del suministro \dot{m}			
Capacidad energética de diseño de la bomba de calor, Q_d	883	-1134	kW
Caudal de agua subterránea, \dot{m}	19,4	29,8	l/s

Fuente: Elaboración propia.

En invierno, el caudal promedio es de 17 [l/s] y en verano es de 26 [l/s]. En base a los antecedentes de pozos de extracción que tiene la municipalidad de Puente Alto [41], es posible bombear hasta 40 [l/s], aunque comprometiendo en promedio 8 [m] de depresión del nivel freático por bombeo. En promedio, los pozos de Puente Alto bombean 30 [l/s].

4.3. Modelamiento y Evaluación de la Anomalía Geotermal

El aprovechamiento de un sistema GSHP de ciclo abierto implica la reinyección del agua subterránea a una temperatura distinta de la que originalmente se extrajo. La zona que se genera en torno al pozo de reinyección se llama Zona de Anomalía Geotermal, Zona de Afectación Termal o TAZ, por las siglas en inglés de *Thermally Affected Zone*.

La correcta implementación de un sistema GSHP requiere de la evaluación de la anomalía geotermal. Por un lado, se busca evitar que la TAZ se extienda hasta alcanzar la zona de bombeo y afecte la temperatura del agua de extracción, como también se espera que el medio afectado por la TAZ se recupere tras los periodos pasivos de otoño y primavera, y que los efectos residuales de verano e invierno se logren contrarrestar con tal de mantener la sustentabilidad del entorno.

Para realizar una evaluación realista del sistema y sus condiciones de operación, se realiza un modelamiento numérico del acuífero estudiado con el software de elementos finitos FEFLOW, desarrollado por Diersch [26].

4.3.1. Contexto Geológico

El estudio se realiza en la comuna de Puente Alto en la zona sur oriente de la cuenca de Santiago de Chile. Ahí, la profundidad hasta el nivel estático del acuífero es de 90 m, y su temperatura es 15°C [28]. El acuífero se compone principalmente de grava y grava arenosa [29], lo que implica una buena permeabilidad y una condición de acuífero no confinado. La profundidad al basamento es de aproximadamente 180 m [30], y finalmente, la altura piezométrica (Figura 4-5), obtenida como la elevación topográfica menos la profundidad del nivel estático, indica la presencia de un flujo natural del acuífero en dirección poniente.

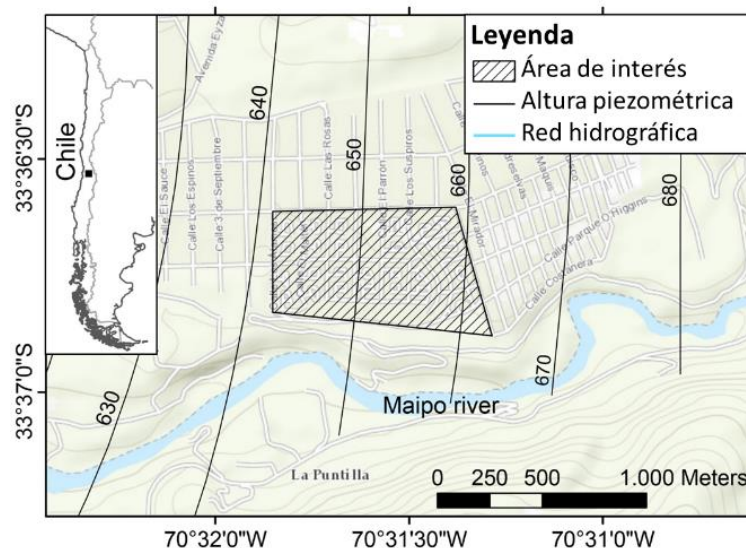


Figura 4-5: Altura piezométrica en torno al área de interés. Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2. Modelo Numérico

La TAZ causada por el funcionamiento del GWHP se evalúa por medio de simulaciones en el software FEFLOW [27].

El modelo numérico del acuífero se construye en un dominio de estudio compuesto por un arreglo de 6000 elementos triangulares distribuidos en una superficie de 2000 × 1500 m², que luego son extendidos en una tercera dimensión, para formar un mallado de prismas triangulares. La profundidad del dominio es de 90 m, y se divide en 18 capas de 5 m cada uno. El método de triangulación del software permite el refinamiento de la malla en torno a los puntos donde se localizan los pozos del sistema para captar los gradientes más altos de temperatura y velocidad que tienen lugar en esas posiciones, tal como se muestra en la Figura 4-6.

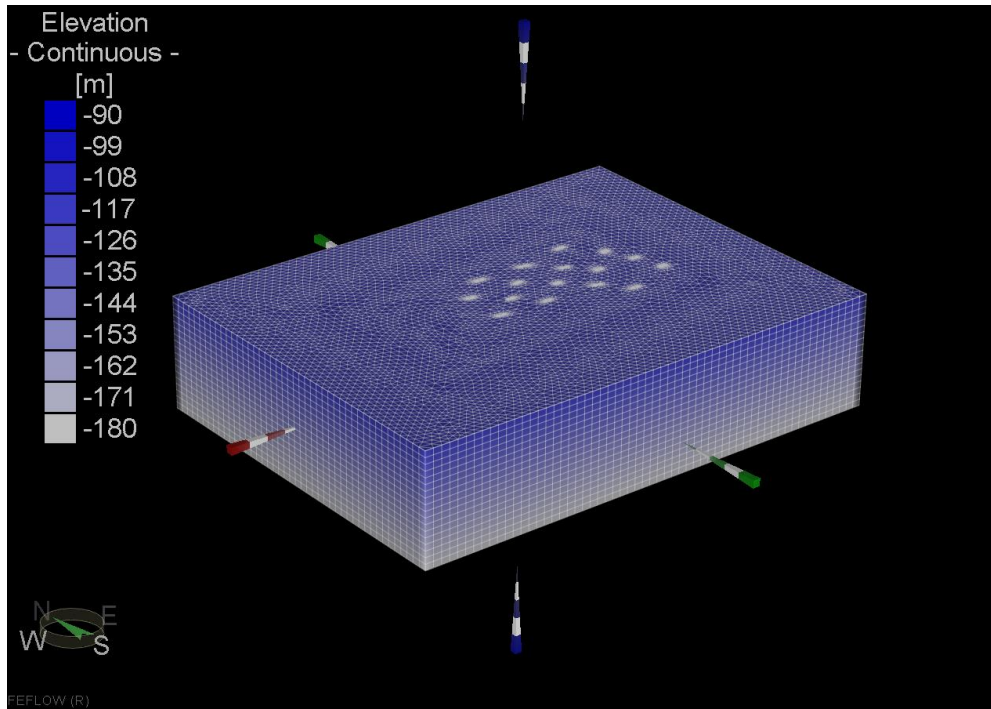


Figura 4-6: Dominio del modelo: 2000 × 1500 × 90 m³. Fuente: Elaboración propia.

El software se basa en las ecuaciones de conservación de masa (4-31), momentum (4-32) y energía (4-33), en medios porosos, para partículas de suelo, agua líquida y aire:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_a \rho^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_a \rho^\alpha v_i^\alpha) = \varepsilon_a \rho^\alpha Q_\rho^\alpha \quad (4-31)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\varepsilon_a \mu^\alpha} \left(\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_j} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \quad (4-32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_a \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_a \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}^\alpha) = \varepsilon_a \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (4-33)$$

Aquí, α corresponde a la fase de agua líquida, vapor de agua, o partículas de suelo sólido, ε_α es la fracción de cada fase ($0 \leq \varepsilon_\alpha \leq 1$), ρ^α es la densidad de la fase α [kg/m^3], v_i es el vector de velocidad de la fase α [m/s], E es la energía interna específica de cada fase [J/kg], k_{ij} es el tensor de permeabilidad [m^2], μ^α es la viscosidad de cada fase [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$], Q_ρ y Q_T representan fuentes de generación de masa y energía respectivamente, y j_{iT} es el flujo de calor.

La simulación se realiza considerando solo la transferencia de calor y masa en la zona saturada del acuífero, sin dispersión del calor sobre o bajo la zona saturada. Al mismo tiempo, las condiciones de operación implementadas corresponden a los caudales de extracción y reinyección calculados en el capítulo 4.2, que son los máximos caudales calculados según las condiciones de diseño para las estaciones de invierno y verano. Por lo tanto, se puede considerar un efecto sobreestimado en los resultados de la modelación de la TAZ.

4.3.3. Parámetros Hidrogeológicos y Térmicos del Modelo

De acuerdo al nivel piezométrico de la Figura 4-5, el gradiente hidráulico es de 3% y genera un flujo natural del acuífero en dirección poniente. Los parámetros hidrogeológicos y térmicos del acuífero se resumen en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20: Parámetros hidrogeológicos y térmicos.

Parámetros Hidrogeológicos	Valor	Unidad
Gradiente hidráulico (%)	3	%
Altura piezométrica aguas arriba	660	msnm
Altura piezométrica aguas abajo	640	msnm
Temperatura del acuífero	15	°C
Conductividad hidráulica	>40	m/día
Porosidad efectiva	0,25	-
Parámetros térmicos		
Capacidad calorífica volumétrica del sólido	1,86	MJ/(K·m ³)
Capacidad calorífica volumétrica del fluido	4,18	MJ/(K·m ³)
Conductividad térmica del medio sólido	0,39	W/(K·m)
Conductividad térmica del fluido	0,58	W/(K·m)

Fuente: Elaboración propia.

La conductividad hidráulica y porosidad efectiva se obtuvieron de acuerdo al tipo de sedimento y valores tabulados en la literatura Custodio y Llamas [14]. La altura piezométrica aguas arriba y aguas abajo fueron calculadas para este trabajo. La temperatura del acuífero fue estimada en base al trabajo de Muñoz et al. [28]. Finalmente, las propiedades térmicas del acuífero fueron obtenidas del trabajo de Perera [31].

4.3.4. Ubicación de pozos

Se define un sistema de pozos como un pozo de extracción y un pozo de reinyección de agua. Cada sistema de pozos forma parte del intercambiador de calor subterráneo de un lote de viviendas, según fueron definidos en el capítulo 4.2.2. Por lo tanto, para cumplir con la demanda de todo el condominio, se consideran 16 sistemas de pozos.

Para determinar la ubicación de los pozos, en primer lugar es necesario conocer la distancia admisible entre un pozo de extracción y un pozo de reinyección con tal de que la TAZ no afecte la zona de extracción de agua.

En segundo lugar, es necesario conocer la extensión máxima de la pluma termal de la TAZ, longitudinal, lateral y verticalmente con tal de no afectar otro sistema de pozos aguas abajo ni a sus costados, como se ve en la Figura 4-7.

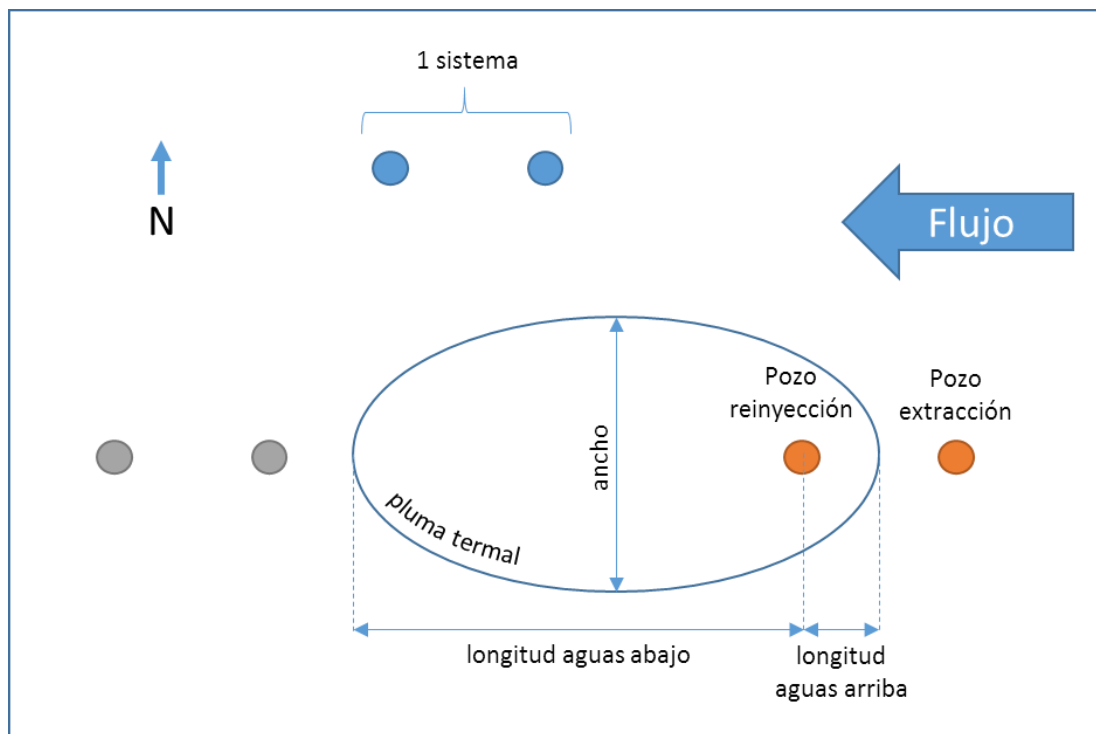


Figura 4-7: Pluma termal de la TAZ e interacción con otros sistemas de pozos. Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.1. Modelo de un Solo Sistema

Se realiza una primera modelación anual de un solo sistema para determinar las dimensiones mencionadas anteriormente. El sistema modelado corresponde a un sistema de pozos con una profundidad de 20 m por debajo del nivel freático, que opera con un caudal de bombeo constante igual al promedio de los caudales de todos los módulos. Este resulta en 27,9 [l/s] en verano y en 20 [l/s] en invierno.

La Figura 4-8 corresponde a la TAZ luego de un periodo de 3 meses de verano en que el sistema GWHP extrae agua del acuífero, se enfrían las viviendas y consecuentemente se reinyecta el agua a una temperatura mayor que la inicial (26,9 °C). La Figura 4-9 corresponde a la vista en corte longitudinal de la misma TAZ.

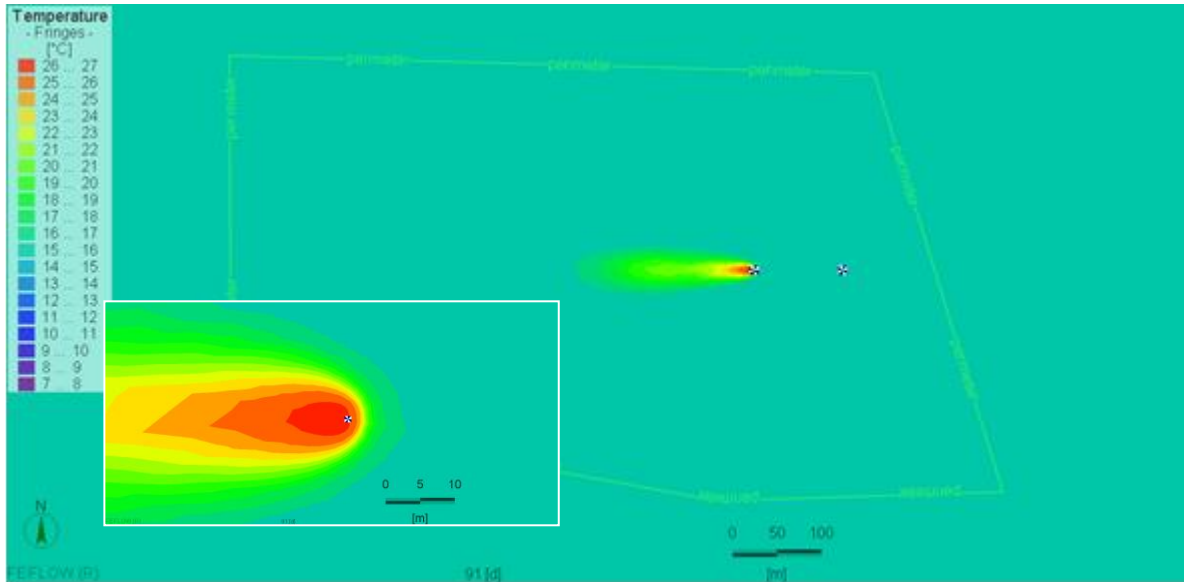


Figura 4-8: Zona de afectación termal al final del periodo de verano para un sistema. Fuente: Elaboración propia.

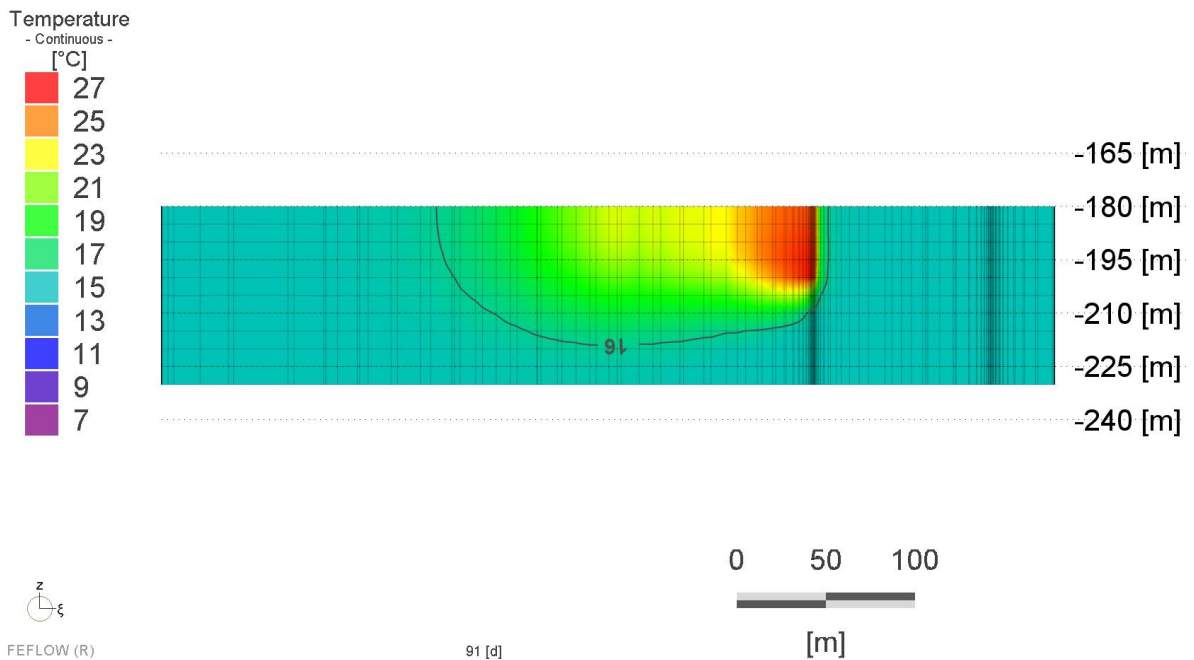


Figura 4-9: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de verano. Fuente: Elaboración propia.

Tras el periodo de verano, se logra identificar claramente una TAZ caliente en torno al pozo de reinyección, que se extiende por sobre los 200 m aguas abajo del pozo, pero que apenas afecta el área aguas arriba en un poco más de 10 m (Figura 4-8). El ancho

máximo de la TAZ es de 60 m, y el efecto vertical es predominante a lo largo de todo el pozo, debido a los efectos de conducción térmica por sus paredes, y se extiende hasta 20 m por debajo de la desembocadura del pozo.

Adicionalmente, le sigue el otoño como un segundo periodo de 3 meses en que el sistema GWHP no trabaja y actúa como un periodo de atenuación de la TAZ, como se ve en la Figura 4-10.

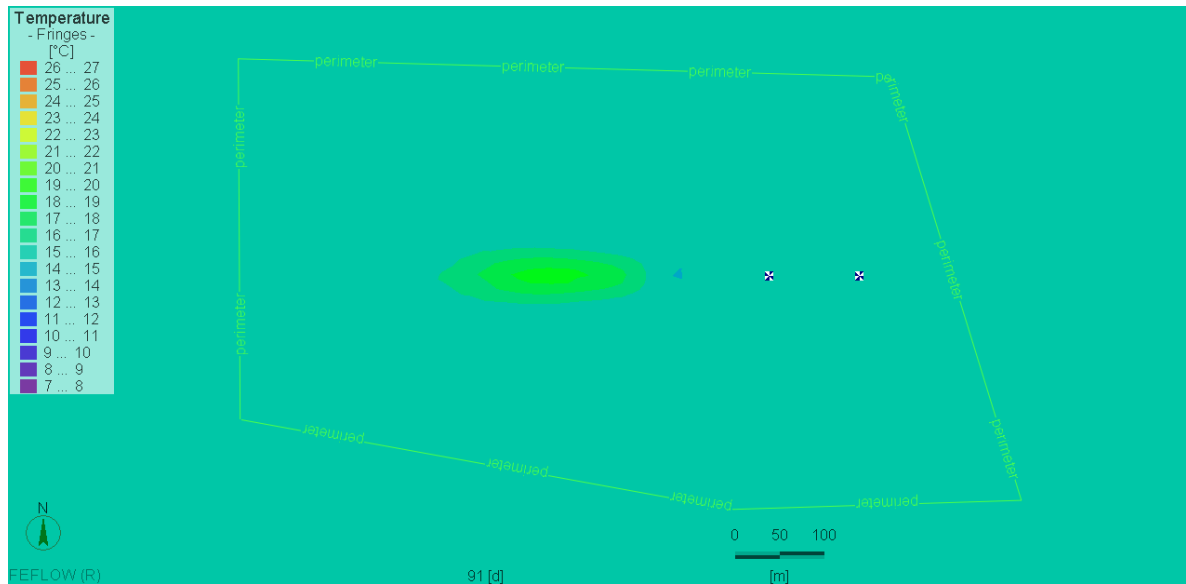


Figura 4-10: Zona de afectación termal al final del periodo de otoño. Fuente: Elaboración propia.

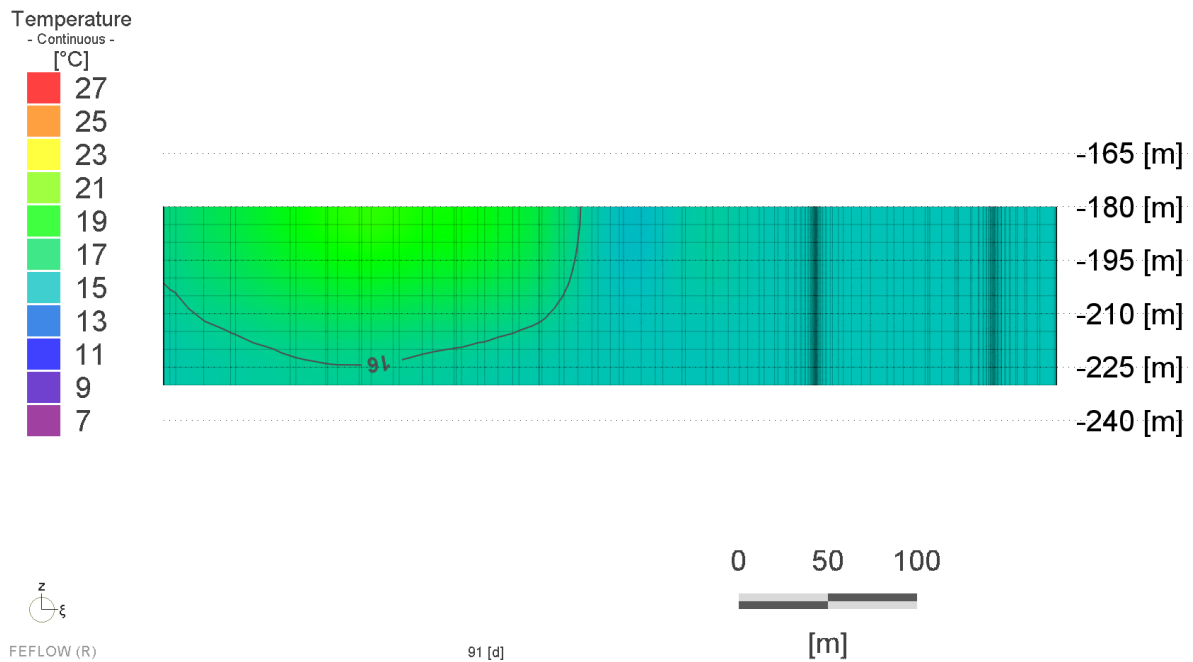


Figura 4-11: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de otoño. Fuente: Elaboración propia.

Aquí (Figura 4-10), la masa de agua caliente es desplazada aguas abajo y su temperatura se disipa hasta alcanzar un máximo de no más de 3°C por sobre la temperatura del acuífero. El ancho de la TAZ se expande levemente hasta alcanzar los 65 m. El efecto vertical de la Figura 4-11 también muestra una expansión de la TAZ hasta alcanzar los 25 m por debajo de la base del pozo.

La Figura 4-12 muestra el resultado obtenido de la TAZ tras el periodo de 3 meses de invierno. Durante este tiempo el sistema GWHP calefacciona las viviendas, extrae agua del acuífero y la reinyecta a una temperatura más fría que la original (7,1°C).

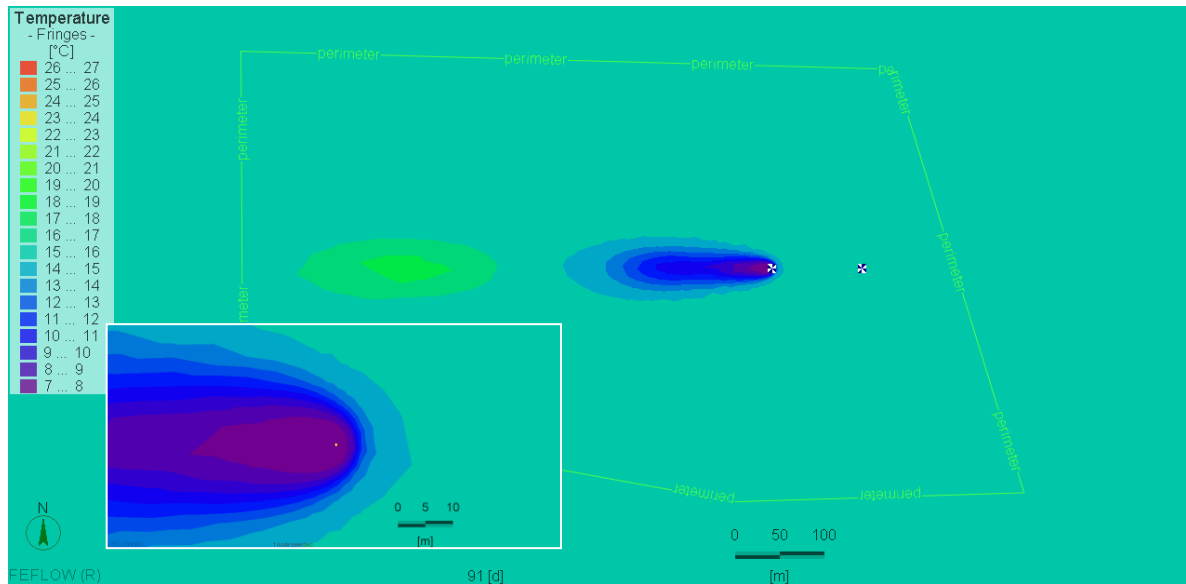


Figura 4-12: Zona de afectación termal al final del periodo de invierno. Fuente: Elaboración propia.

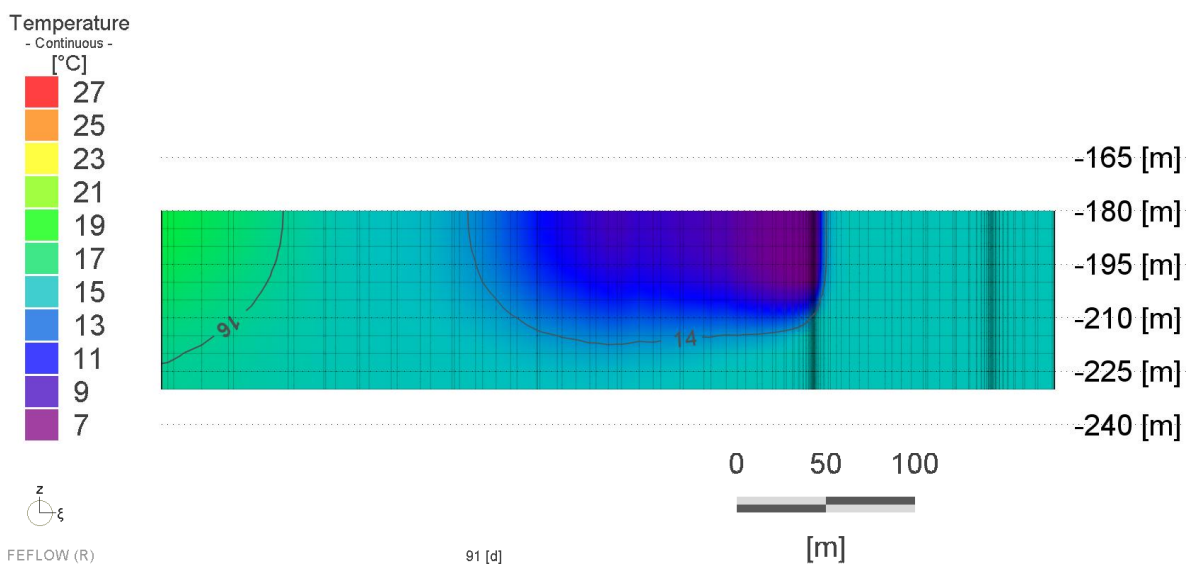


Figura 4-13: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de invierno. Fuente: Elaboración propia.

Tras el periodo de invierno se ve la formación de una TAZ fría, que se extiende por más de 230 m aguas abajo del punto de reinyección, y con un efecto aguas arriba de aproximadamente 15 m (Figura 4-12). Esta mayor influencia se debe a que las horas de funcionamiento del sistema GWHP es el doble en invierno que en verano, como se especificó en el capítulo 4.1.3. El efecto vertical es de 15 m por debajo de la base del pozo (Figura 4-13). Por último, la masa caliente remanente de la TAZ de verano continúa desplazándose aguas abajo, sin entrar en contacto con la TAZ de invierno.

Finalmente, durante otros 3 meses de primavera, el sistema GWHP reposa y la TAZ se desplaza y se atenúa (Figura 4-14). Esta vez la TAZ alcanza un ancho máximo de 95 metros y mantiene su efecto vertical en 15 m por debajo de los pozos (Figura 4-15).

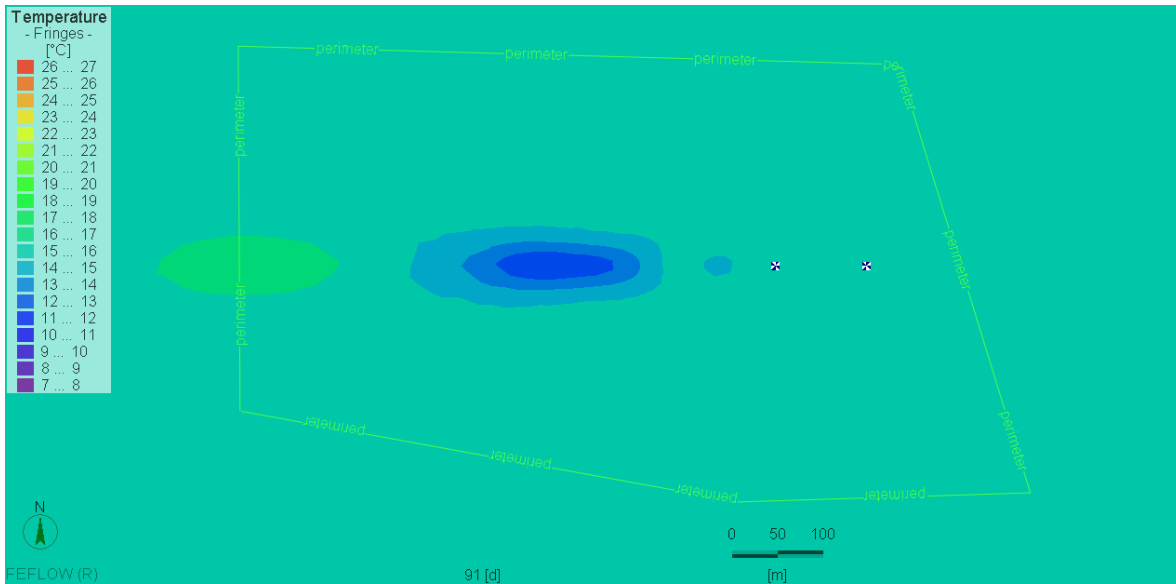


Figura 4-14: Zona de afectación térmica al final del periodo de primavera. Fuente: Elaboración propia.

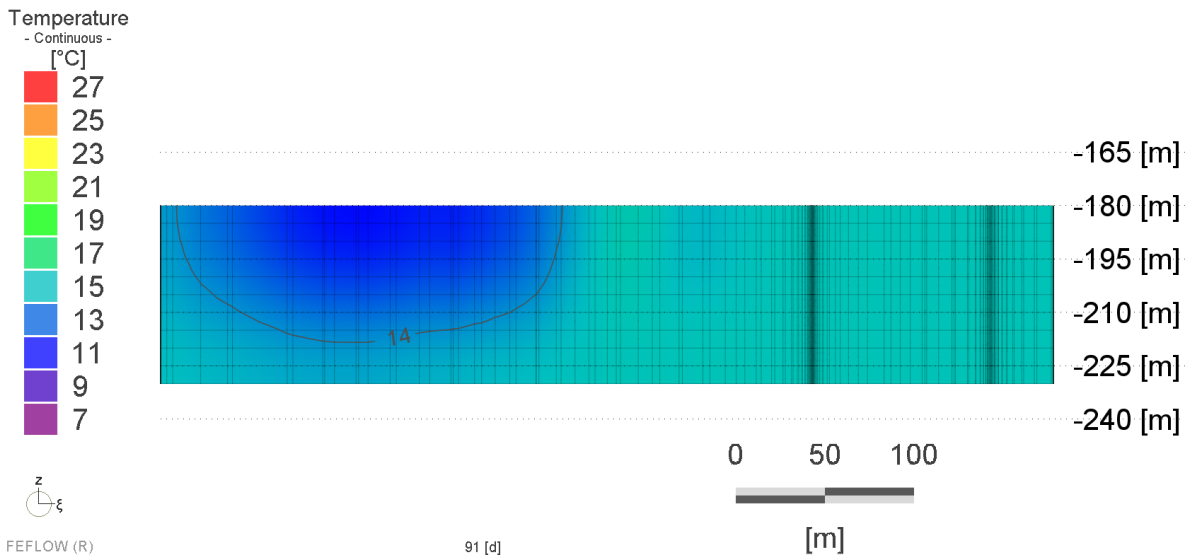


Figura 4-15: Vista en cote de la TAZ al final del periodo de primavera. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la distancia entre un pozo de extracción y reinyección debe ser de al menos 15 m, y dos sistemas de pozos deben ser ubicados a una distancia de al menos 100 metros entre sus líneas de flujo, tal como se muestra en la Figura 4-16.

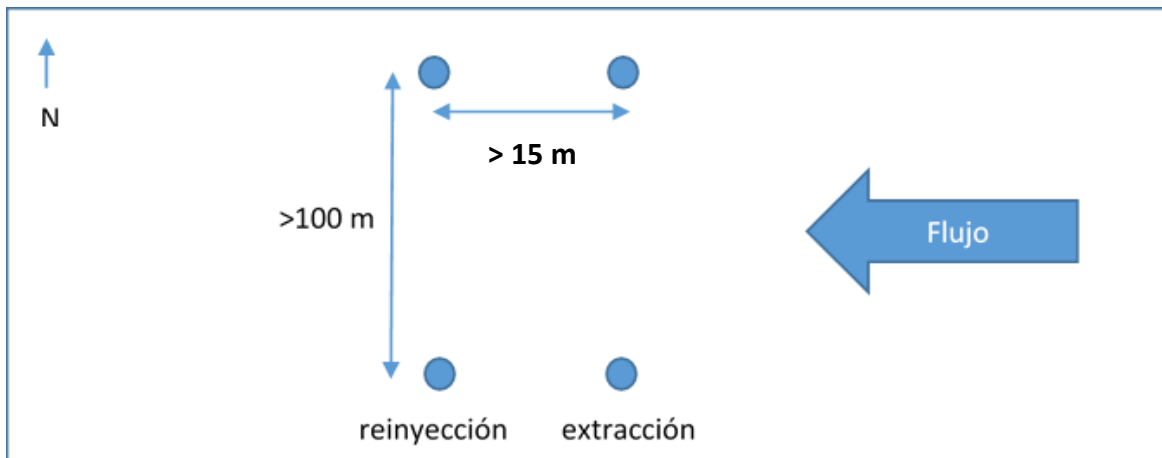


Figura 4-16: Restricciones de separación de pozos. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al efecto vertical de la TAZ, este predomina hacia arriba de la desembocadura del pozo, y se extiende en un máximo de 25 m por debajo de él. Esto significa que de haber un segundo sistema de pozos aguas abajo del primero, su base debe estar a una profundidad de al menos 25 m por debajo de la desembocadura de los pozos aguas arriba. Como el dominio de estudio corresponde a un acuífero de 90 m de profundidad, y el sistema de pozos menos profundo se extiende 20 m bajo el nivel estático para contrarrestar el efecto de depresión por bombeo, queda distribuir los sistemas de pozos como se muestra en la Figura 4-17. Aquí, el sistema de pozos que se ubica más al oeste (aguas abajo) no alcanza a proyectarse a una profundidad mayor a los 70 m bajo el nivel freático, por lo que se decide repetir la profundidad de 20 m y minimizar el efecto que tengan los sistemas aguas arriba sobre él.

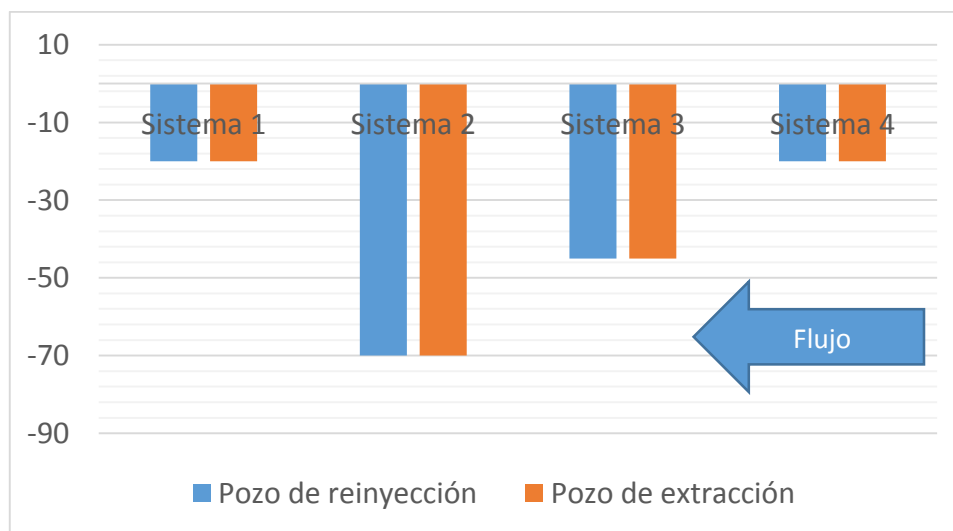


Figura 4-17: Vista en corte con ubicación de pozos según profundidad. Fuente: Elaboración propia.

4.3.4.2. Modelo con Conjunto de Sistemas.

En base a los módulos definidos en el capítulo 4.2.2 y a las restricciones obtenidas en el capítulo 4.3.4.1, se propone la configuración de sistemas de pozos esquematizado en la Figura 4-18.

Se puede observar que en una misma línea de flujo este-oeste, puede haber hasta cuatro sistemas de pozos, en que los sistemas que se encuentran aguas abajo se verán afectados por las TAZ de los sistemas aguas arriba. Debido a esto, se aplica la configuración propuesta en la Figura 4-17.

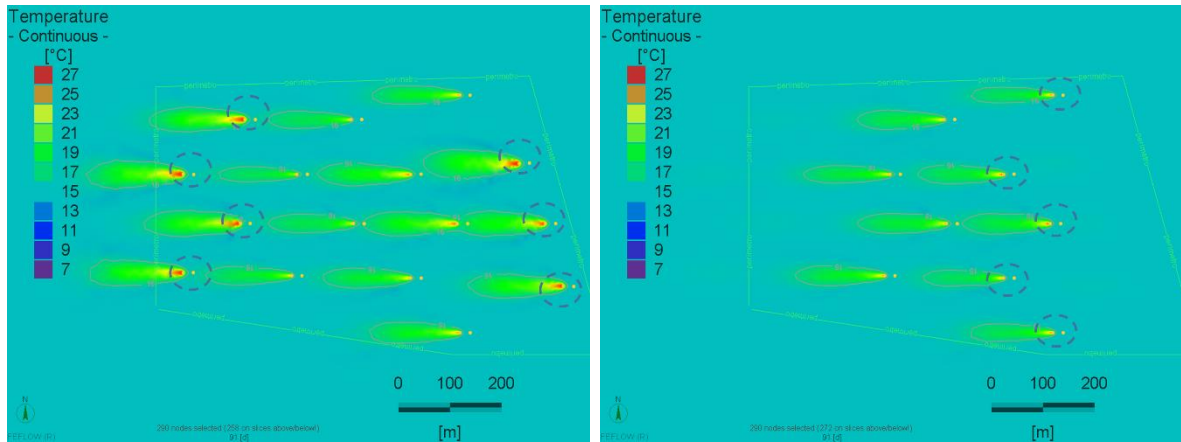


Figura 4-18: Localización de pozos. Fuente: Adaptación de [11].

Se procede a modelar el conjunto completo de sistemas para un ciclo de un año, con caudales de operación constante para las estaciones de verano e invierno según los resultados obtenidos en el capítulo 4.2.3. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

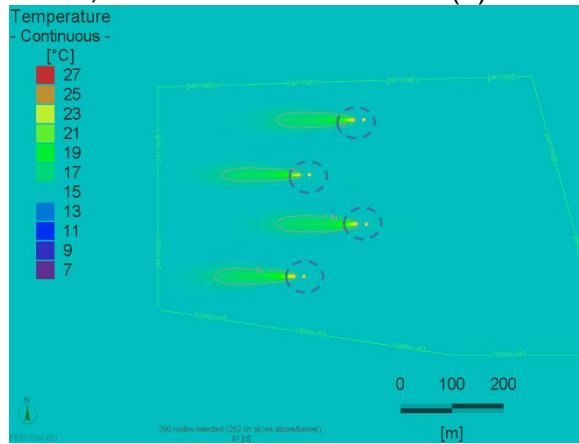
La Figura 4-19, Figura 4-20, Figura 4-21 y Figura 4-22 muestran la TAZ al final del periodo de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente. Se muestran las vistas en los planos a las profundidades de 20, 45 y 70 m, que corresponden a los planos en que se encuentran las bases de los pozos, marcadas por una elipse de línea segmentada. También se muestra la vista en corte para ver el efecto vertical de la TAZ. Se señala la temperatura media en cada plano, que se obtiene al promediar la temperatura de cada nodo en el área contenida en un radio de 100 m en torno a la posición de todos los sistemas. Finalmente, también se anota la temperatura media del acuífero completo en el mismo volumen de interés, contenido en un radio de 100 m en torno a la posición de los pozos y a lo profundo de todo el acuífero.

El resultado de la Figura 4-20 es relevante pues presenta las condiciones de inicio del invierno, en que los sistemas GWHP comienzan a operar nuevamente.

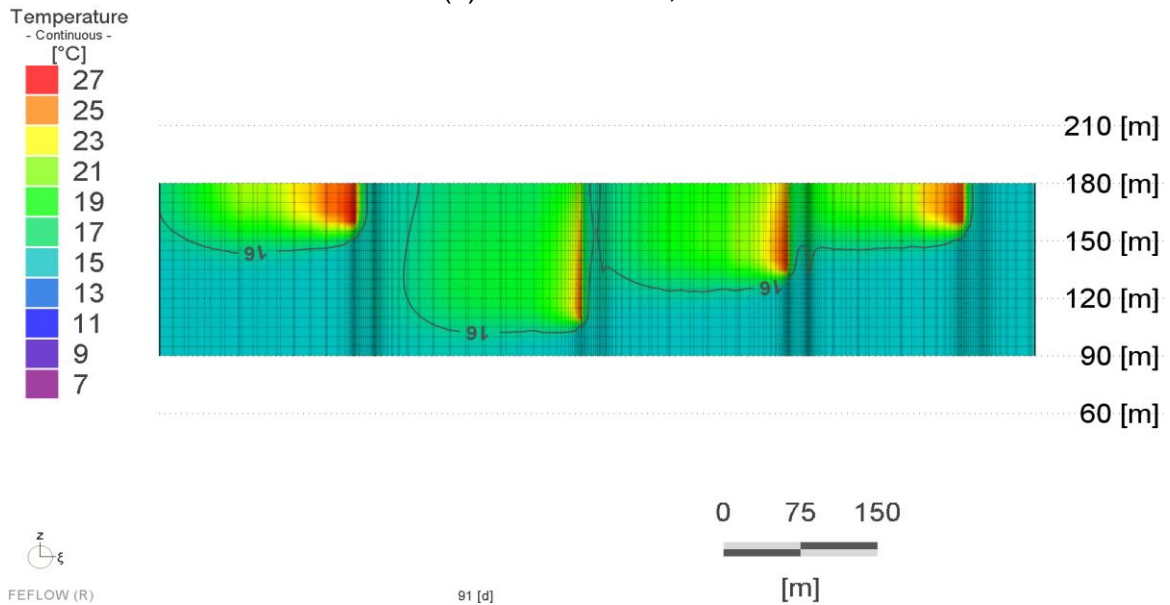


(a) 20 m. $T = 16,8^{\circ}\text{C}$

(b) 45 m. $T = 15,9^{\circ}\text{C}$

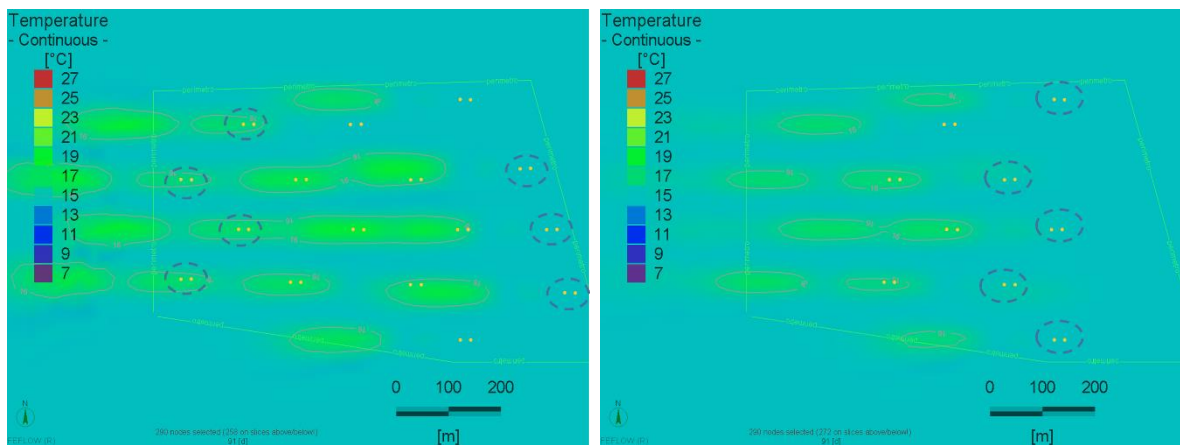


(c) 70 m. $T = 15,3^{\circ}\text{C}$



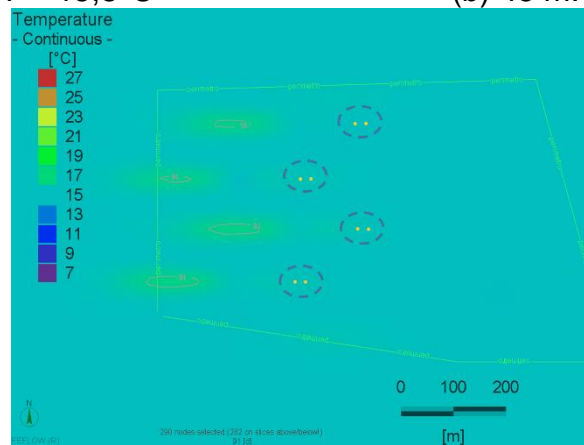
(d) Vista en corte
T promedio acuífero: $15,9^{\circ}\text{C}$

Figura 4-19: Zona de afectación termal al final del periodo de verano. Fuente: Elaboración propia.

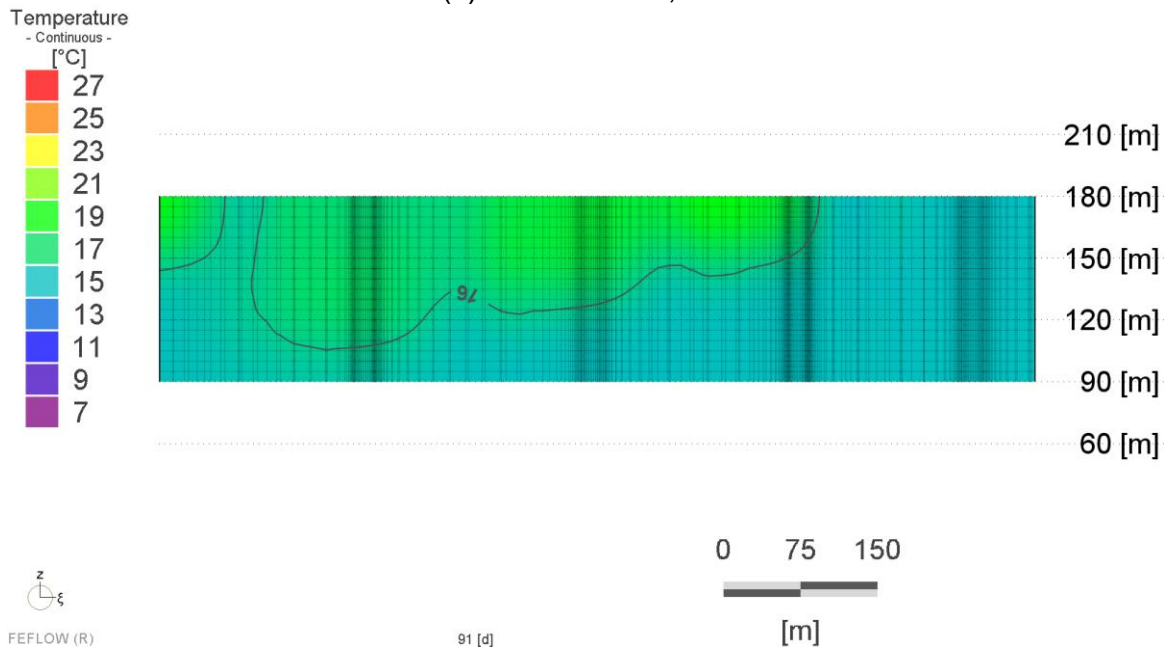


(a) 20 m. $T = 15,8^{\circ}\text{C}$

(b) 45 m. $T = 15,5^{\circ}\text{C}$

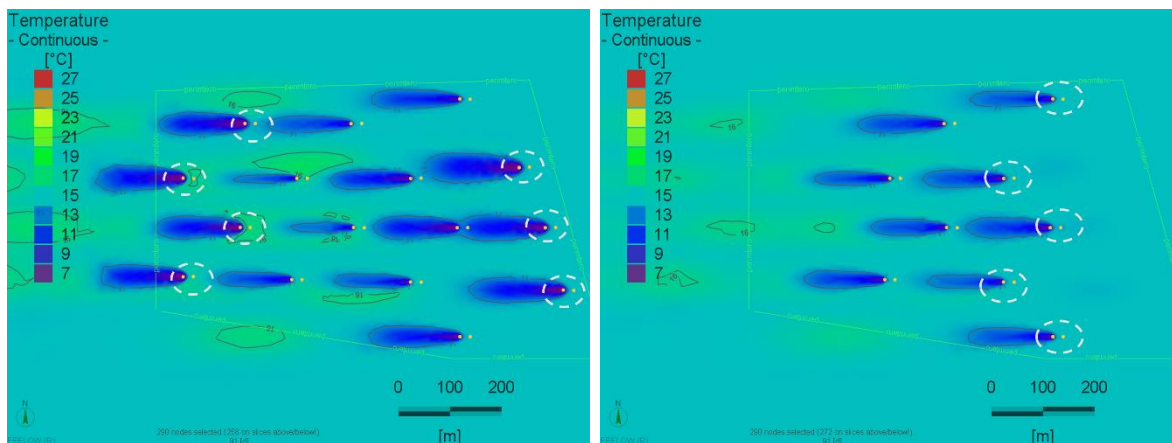


(c) 70 m. $T = 15,2^{\circ}\text{C}$



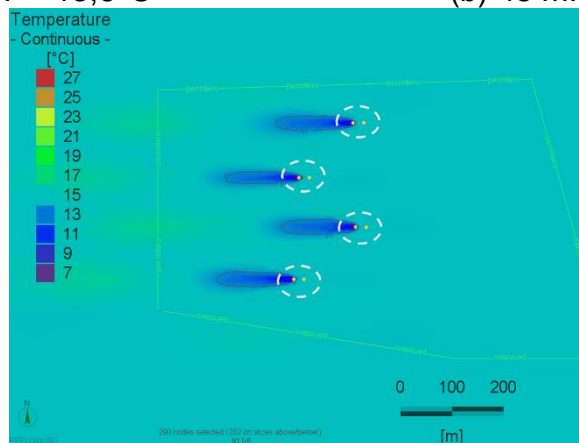
(d) Vista en corte
 T promedio acuífero: $15,5^{\circ}\text{C}$

Figura 4-20: Zona de afectación termal al final del periodo de otoño. Fuente: Elaboración propia.

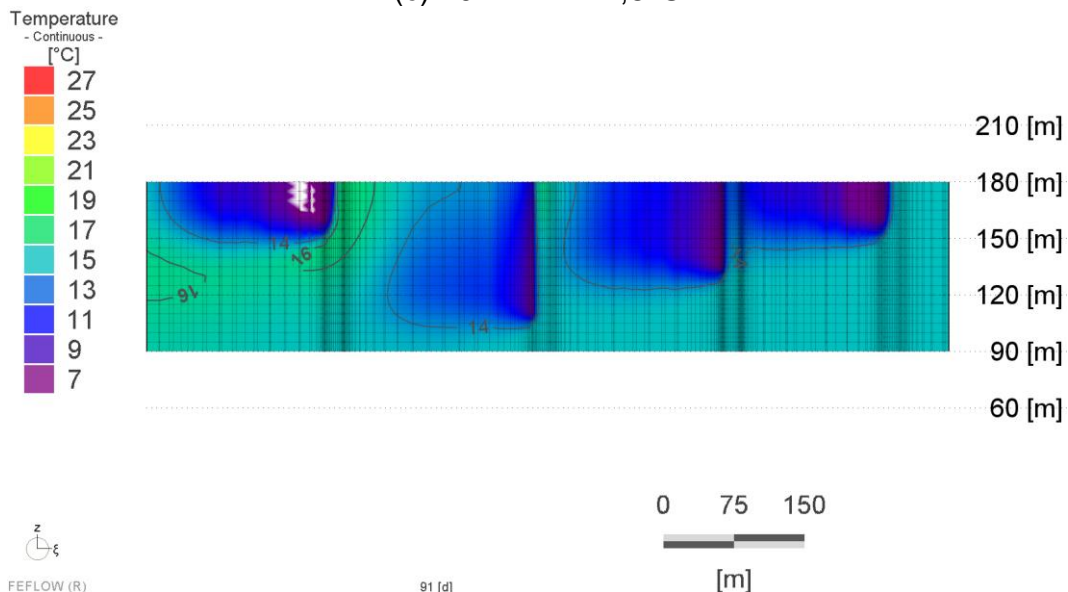


(a) 20 m. $T = 13,6^{\circ}\text{C}$

(b) 45 m. $T = 14,4^{\circ}\text{C}$

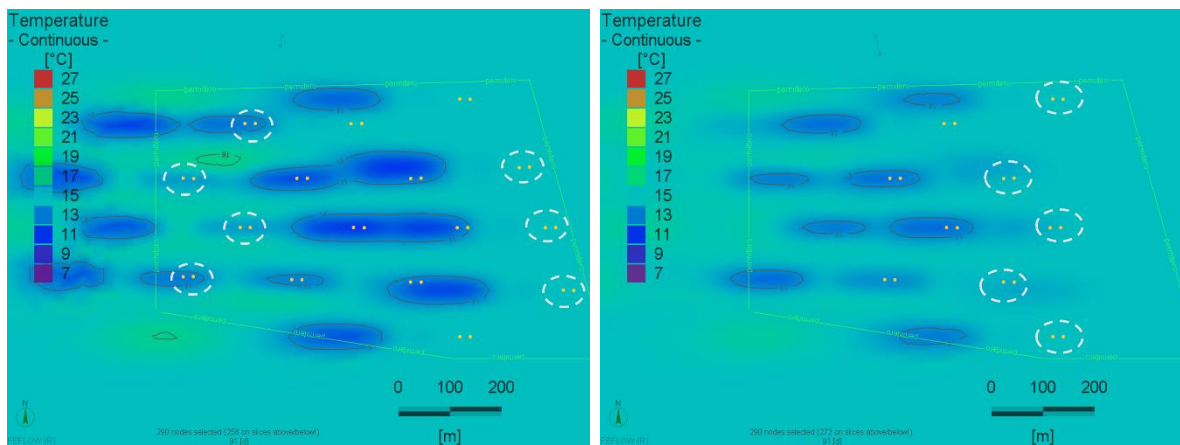


(c) 70 m. $T = 14,8^{\circ}\text{C}$



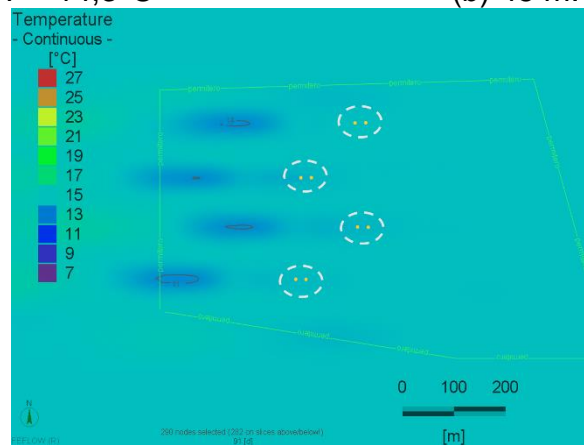
(d) Vista en corte
 T promedio acuífero: $14,4^{\circ}\text{C}$

Figura 4-21: Zona de afectación termal al final del periodo de invierno. Fuente: Elaboración propia.

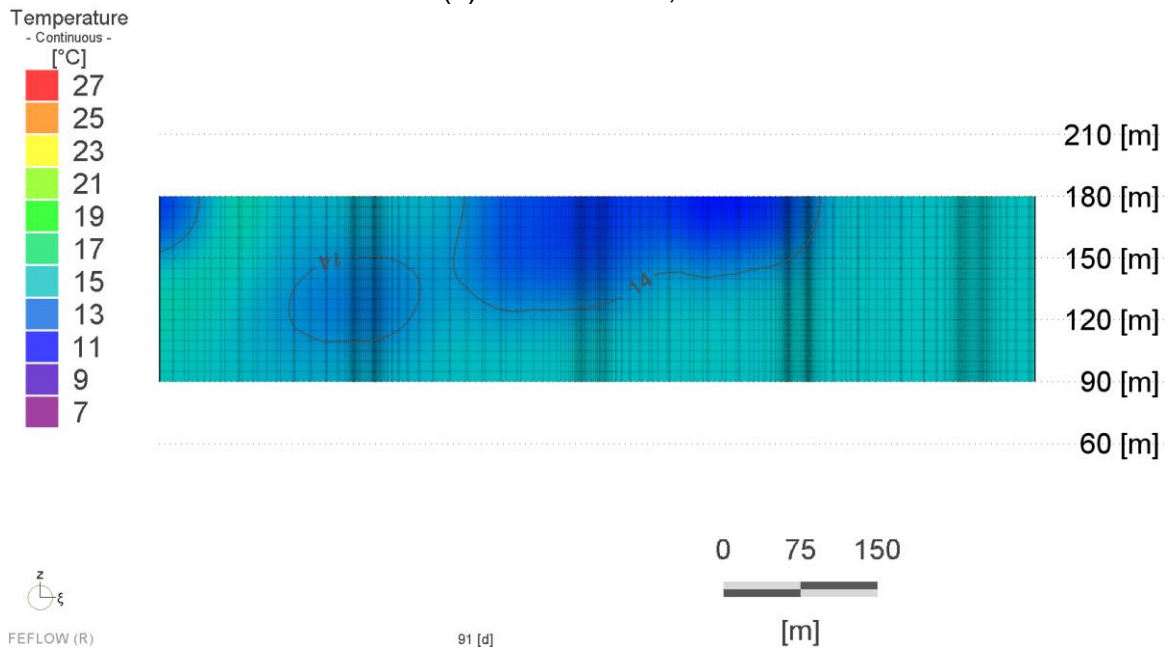


(a) 20 m. $T = 14,3^{\circ}\text{C}$

(b) 45 m. $T = 14,5^{\circ}\text{C}$



(c) 70 m. $T = 14,8^{\circ}\text{C}$



(d) Vista en corte
 T promedio acuífero: $14,6^{\circ}\text{C}$

Figura 4-22: Zona de afectación termal al final del periodo de primavera. Fuente: Elaboración propia.

Se observa como en la Figura 4-19 y en la Figura 4-21 las TAZ aguas arriba apenas alcanzan las zonas de extracción aguas abajo al final del verano e invierno respectivamente, salvo pocas excepciones como en la Figura 4-19 (a) y en la Figura 4-21 (a). Además, se puede ver una alteración de la temperatura en torno a las bases de los pozos de extracción, a los 20 m y 45 m de profundidad, tanto al final de las estaciones de otoño (Figura 4-20 (a) y (b)) como de primavera (Figura 4-22 (a) y (b)). Esta variación en no más de 1 a 2°C puede incluso considerarse beneficiosa para el sistema, debido a que una temperatura del acuífero de 1°C más alta en invierno induce a una tasa de bombeo un 11% menor; y una temperatura del acuífero de 1°C más baja en verano promueve una tasa de bombeo un 8% menor. Los pozos de extracción que se extienden hasta los 70 m de profundidad no se ven afectados en ningún caso. No obstante, se debe recordar que los resultados obtenidos de la modelación representan una situación sobrestimada de la realidad, de acuerdo a las suposiciones mencionadas en el capítulo 4.3.2. De esta manera, se puede considerar que la ubicación de los pozos propuesta no afecta la eficiencia del sistema. Queda propuesto realizar un modelamiento dinámico del sistema, en que las tasas de bombeo varíen con respecto a la demanda térmica temporal. Se esperaría que las zonas de afectación termal fuesen menores.

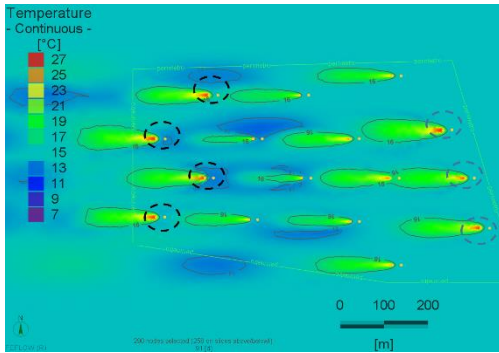
Cabe ahora preguntarse si la alteración termal es consistente en el tiempo, por más de un ciclo anual, y no provoca una modificación progresiva en la temperatura del acuífero. Si esto ocurre, la sustentabilidad del proyecto quedaría bajo cuestionamiento.

4.3.4.3. Modelo de un Segundo Ciclo

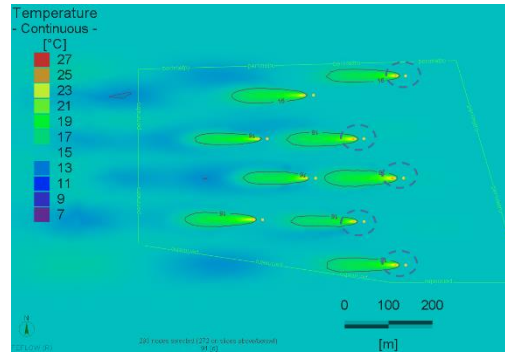
Los siguientes resultados representan las TAZ, bajo las mismas condiciones que los modelos anteriores, al final de cada estación, para un segundo año, a partir de los resultados del primer año del modelo.

La Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25 y Figura 4-26 corresponden a las TAZ al final del periodo de verano, otoño, invierno y primavera respectivamente.

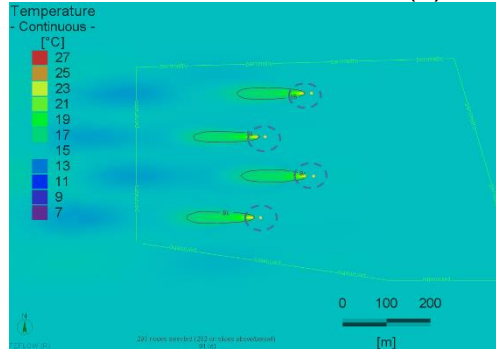
Para analizar el efecto progresivo de la afectación termal sobre el medio, es necesario fijarse en la temperatura promedio del acuífero al final de cada estación y compararla con las temperatura promedio obtenidas en los resultados del capítulo 4.3.4.2.



(a) 20 m. $T = 16,5^{\circ}\text{C}$



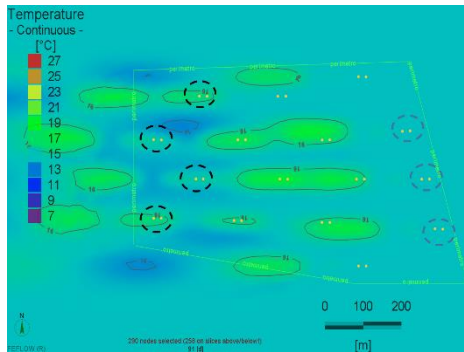
(b) 45 m. $T = 15,7^{\circ}\text{C}$



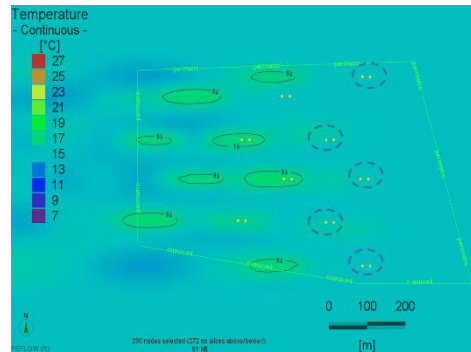
(c) 70 m. $T = 15,3^{\circ}\text{C}$

T promedio acuífero: $15,7^{\circ}\text{C}$

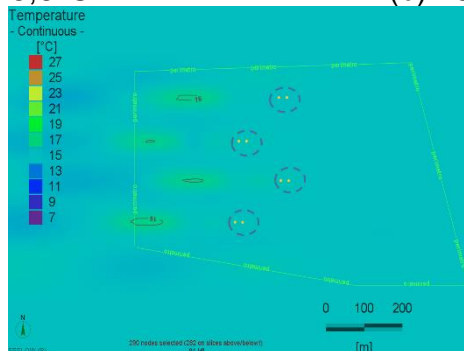
Figura 4-23: TAZ al término del verano del segundo año. Fuente: Elaboración propia.



(a) 20 m. $T = 15,6^{\circ}\text{C}$



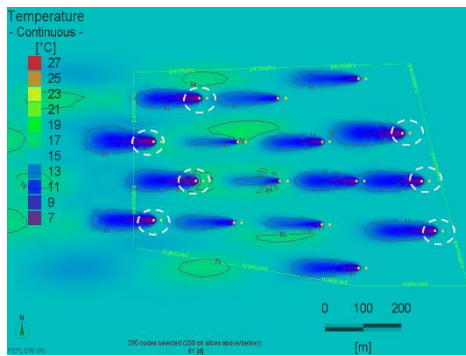
(b) 45 m. $T = 15,4^{\circ}\text{C}$



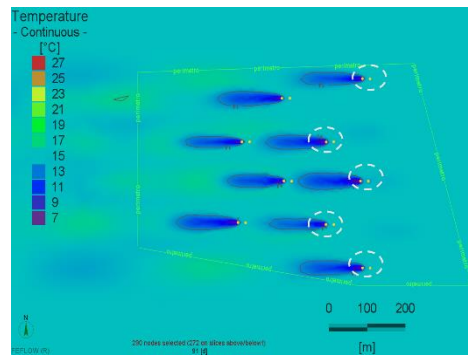
(c) 70 m. $T = 15,2^{\circ}\text{C}$

T promedio acuífero: $15,4^{\circ}\text{C}$

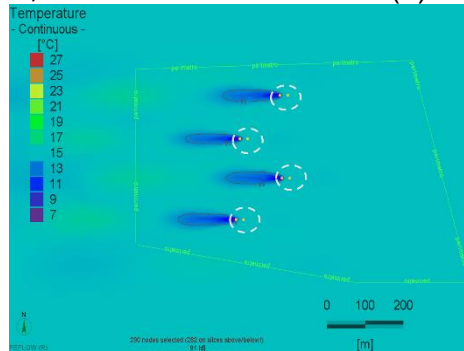
Figura 4-24: TAZ al término del otoño del segundo año. Fuente: Elaboración propia.



(a) 20 m. $T = 13,6^{\circ}\text{C}$



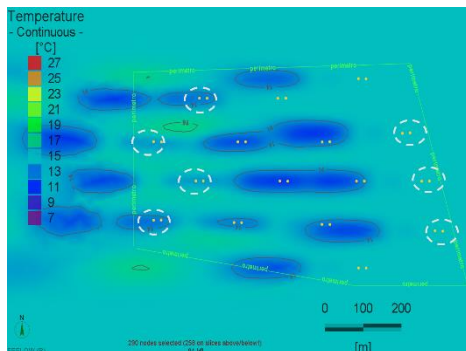
(b) 45 m. $T = 14,4^{\circ}\text{C}$



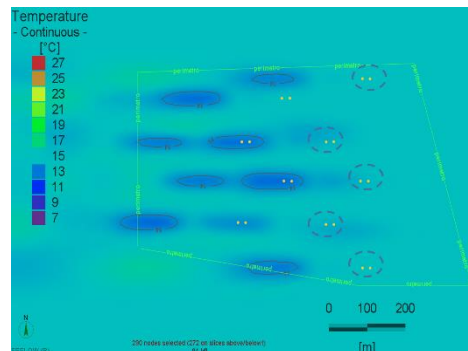
(c) 70 m. $T = 14,8^{\circ}\text{C}$

T promedio acuífero: $14,3^{\circ}\text{C}$

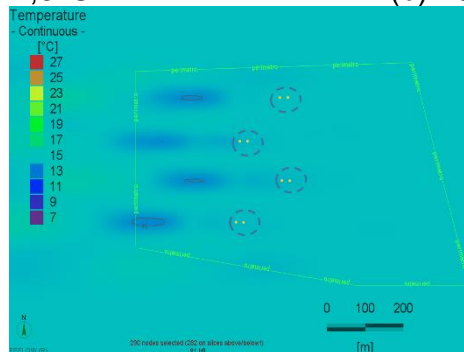
Figura 4-25: TAZ al término del invierno del segundo año. Fuente: Elaboración propia.



(a) 20 m. $T = 14,3^{\circ}\text{C}$



(b) 45 m. $T = 14,5^{\circ}\text{C}$



(c) 70 m. $T = 14,8^{\circ}\text{C}$

T promedio acuífero: $14,6^{\circ}\text{C}$

Figura 4-26: TAZ al término de la primavera del segundo año. Fuente: Elaboración propia.

La siguiente Tabla 4-21 resume las temperaturas promedio obtenidas en el acuífero al final de cada estación para el primer y segundo año del modelo.

Tabla 4-21: Evolución de la temperatura promedio en los planos de interés.

Estación	Profundidad, [m]	Temperatura promedio, [°C]	
		1° año	2° año
Verano	20	16,8	16,5
	45	15,9	15,7
	70	15,3	15,3
	completo	15,9	15,7
Otoño	20	15,8	15,6
	45	15,5	15,4
	70	15,2	15,2
	completo	15,5	15,2
Invierno	20	13,6	13,6
	45	14,4	14,4
	70	14,8	14,8
	completo	14,4	14,3
Primavera	20	14,3	14,3
	45	14,5	14,5
	70	14,8	14,8
	completo	14,6	14,6

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados observados en la Tabla 4-21, si bien hay una alteración mayor de la temperatura del acuífero al final de las estaciones de verano y otoño, al final del año esto se regulariza, y por lo tanto se puede concluir que no existe un efecto progresivo de la alteración geotermal sobre el acuífero al final de un ciclo. En consecuencia, el proyecto es sustentable desde el punto de vista de la estabilidad termal del acuífero.

Por último, la posición de los sistemas de pozos aquí propuesta sirve como plan regulador para quienes quieran implementar de manera parcial el proyecto, sin afectar la potencial instalación de otros pozos a futuro dentro del condominio.

4.4. Dimensionamiento y Caracterización de Equipos

A continuación se describe el dimensionamiento, caracterización y estimación de costos de los principales componentes del sistema.

4.4.1. Intercambiadores de Calor Intermedios

Debido a que la composición química del agua proveniente de acuíferos subterráneos puede tener un efecto corrosivo en los materiales típicos de construcción, se recomienda aislar el ciclo abierto del agua del acuífero del ciclo cerrado del refrigerante en la bomba

de calor. Por esta razón se diseñan intercambiadores de calor intermedios que transfieran la energía desde el recurso geotérmico hacia un ciclo cerrado intermedio de distribución, que posteriormente transfiere la energía hacia las bombas de calor.

La tarea de transferir calor desde la fuente geotermal al ciclo cerrado intermedio comúnmente se realiza por medio de intercambiadores de calor de placas. Estos pueden ser del tipo con empaquetaduras o soldadas, aunque estas últimas se limitan a aplicaciones pequeñas de no más de 4 m² de área de intercambio y no permiten el desarme de sus piezas soldadas para limpiar y/o agrandar el intercambiador [32].

Por otro lado, los intercambiadores de calor de placa con empaquetadura se caracterizan por tener altos coeficientes de transferencia térmica, ser compactos y asociarse a una amplia disponibilidad de materiales de construcción resistentes a la corrosión. Debido a que el área de transferencia se construye de finas placas de metal, estas pueden ser de acero inoxidable y costar mucho menos que si se usaran intercambiadores de carcasa y tubos [32].

La Figura 4-27 representa un intercambiador de placas con empaquetadura y la Figura 4-28 un intercambiador instalado en un sistema de calefacción distrital geotérmico en Oregón, EEUU para una capacidad de 5,9 [GWh/año].

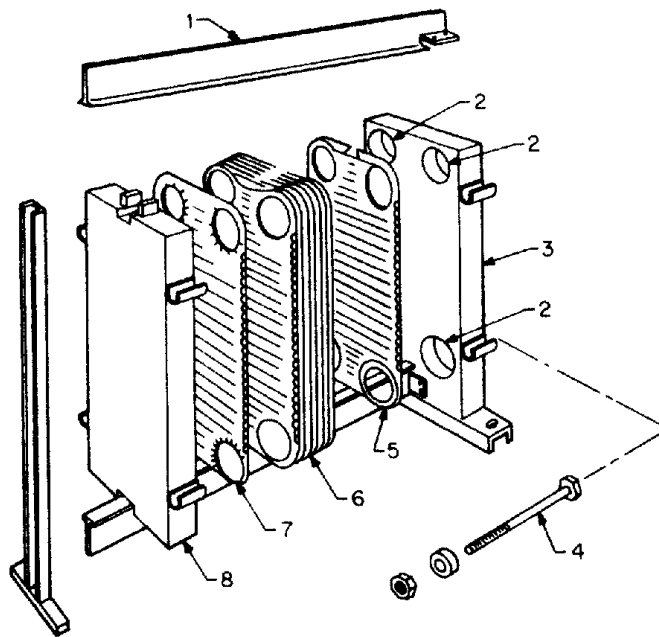


Figura 4-27: Vista explosionada de un intercambiador de placas. (1) Barra guía. (2) Conexiones. (3) Marco fijo. (4) Perno de fijación. (5) Placa de cierre con cuatro agujeros. (6) Placa intermedia con cuatro agujeros. (7) Placa de cierre con cuatro agujeros ciegos. (8) Placa de presión. Fuente: [33].



Figura 4-28: Intercambiador de calor de placas y bombas de circulación en sistema de calefacción distrital geotérmico en Oregón, EEUU. Fuente: [34].

El dimensionamiento de un intercambiador de este tipo consiste en el cálculo de un área estimada que permita evaluar preliminarmente (con un 30% de certeza) el costo del intercambiador. Esta área se calcula por medio de la ecuación (4-34), donde Q es el calor transferido en el intercambiador, U es el coeficiente global de transferencia de calor entre los fluido del proceso y ΔT_{log} es la diferencia media logarítmica de temperatura calculada como en la ecuación (4-35).

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{log}} \quad (4-34)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_e - t_s) - (T_s - t_e)}{\ln\left(\frac{T_e - t_s}{T_s - t_e}\right)} \quad (4-35)$$

Aquí, T_e , T_s , t_e y t_s son las temperaturas de entrada (e) y salida (s) del fluido caliente y frío respectivamente.

Para el valor del coeficiente global de transferencia de calor se utilizará $U = 900 [Btu/h ft^2 \text{ } ^\circ F] = 5110,47 [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$ según lo indicado en Lienau [32] por Hulbert [35] para intercambiadores de calor de placa.

También, se calcula la pérdida de presión en el intercambiador, según Lienau [32] como $\Delta P = 3,5 \times NTU [psig]$. Aquí, NTU es el Número de Unidades de Trasferencia definido como se indica en la ecuación (4-36), donde ΔT_m es la máxima variación de temperatura en alguno de los fluidos.

$$NTU = \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{log}} \quad (4-36)$$

Para la estimación del costo de los intercambiadores, se utiliza la herramienta de análisis de costos de equipos industriales de Peters et al. [36].

La Tabla 4-22 contiene las variables necesarias para el dimensionamiento, ya determinadas en los capítulos anteriores, y el cálculo del área preliminar de intercambio térmico, la pérdida de presión y costo de los intercambiadores, según el módulo y la aplicación (calefacción o enfriamiento).

Tabla 4-22: Dimensionamiento de los intercambiadores de calor de placa.

Módulo		A		B		C		D		Unidad	
Estación		calef.	enfri.	calef.	enfri.	calef.	enfri.	calef.	enfri.		
Fluido frío	T _e	15,0	29,7	15,0	29,7	15,0	29,7	15,0	29,7	°C	
	T _s	7,4	23,9	7,4	23,9	7,4	23,9	7,4	23,9	°C	
	M	0,0160	0,0467	0,0177	0,0511	0,0194	0,0562	0,0213	0,0621	m ³ /s	
Fluido calien	t _e	4,6	15,0	4,6	15,0	4,6	15,0	4,6	15,0	°C	
	t _s	7,2	26,9	7,2	26,9	7,2	26,9	7,2	26,9	°C	
	m	0,0467	0,0228	0,0511	0,0250	0,0562	0,0275	0,0621	0,0304	m ³ /s	
Intercambio	Q	517	1.118	573	1.225	628	1.347	689	1.489	kW	
	U	5.110,47	5.110,47	5.110,47	5.110,47	5.110,47	5.110,47	5.110,47	5.110,47	W/m ² C	
	ΔT _{log}	4,9	5,3	4,9	5,3	4,9	5,3	4,9	5,3	°C	
	A	21	41	23	45	25	50	27	55	m²	
	ΔP	5	8	5	8	5	8	5	8	psig	
Costo Unitario		848	1.112	886	1.163	911	1.226	936	1.289	USD	
Inversión total solo calefacción										14.324	USD
Inversión total con enfriamiento										19.160	USD

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los resultados de la Tabla 4-22, se puede apreciar que el área de intercambio para un sistema que incluye la opción de enfriar en verano es casi el doble del área del sistema que solo calefacciona. Esto se traduce en costos de entre un 30 y un 40% más caros por equipo, significando en un aumento del 34% del precio de inversión total de esta componente.

4.4.2. Bombas de Calor Geotérmicas

Para el dimensionamiento de las bombas de calor geotérmicas se recurre al catálogo de Productos ANWO de Energías Renovables [37], cuyas fichas técnicas de interés se

adjuntan como Anexo C. La Figura 4-29 representa la gama variable de bombas de calor según su capacidad térmica.

En base a los requerimientos de potencia para calor y frío ya calculados en las viviendas, se escoge el producto que más se adapte a lo necesario. En esta oportunidad, se opta por una configuración sencilla, en que se contempla la instalación de una bomba de calor por cada par de viviendas. Esto significa la instalación de 1.044 bombas de calor para todo el condominio.



Figura 4-29: Variedades de bombas de calor geotérmicas. Fuente: Adaptado de [37].

Entonces, considerando la demanda térmica de diseño para las estaciones de invierno y verano por cada par de viviendas según la Tabla 4-8, y la oferta disponible en el catálogo ANWO [37], se escogen las bombas de calor de acuerdo a su capacidad térmica y a su precio. La Tabla 4-23 muestra la selección de los equipos y el cálculo del costo de inversión para los casos con y sin enfriamiento incluido.

Tabla 4-23: Dimensionamiento de bombas de calor geotérmicas.

Tipología de vivienda según superficie	45	50	56	61	Unidad
Demanda de calor	10,3	11,3	12,9	13,8	kW
Capacidad de Bomba de Calor (Precio)	12,0 (5.901)	12,0 (5.901)	15,3 (8.730)	15,3 (8.730)	kW (USD)
Demanda de frío	13,0	14,2	17,7	18,8	kW
Capacidad de bomba de Calor (Precio)	15,3 (9.700)	15,3 (9.700)	19,8 (9.600)	19,7 (9.600)	kW (USD)
Inversión total solo calefacción	7.031.976				USD
Inversión total con enfriamiento	10.096.000				USD

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los resultados de la Tabla 4-23, se puede apreciar que la mayor demanda de energía en verano no solo requiere de bombas de calor más potentes, sino también que sean reversibles. Esto se traduce en que la inversión en bombas de calor sea un 44% mayor para un sistema que incluye enfriamiento por sobre uno que solo calefacciona.

4.4.3. Sistema de Distribución

Se entiende por sistema de distribución al encargado de transmitir la energía entre la bomba de calor y el interior de los ambientes a climatizar.

Como este trabajo trata con viviendas ya construidas, se descarta la opción de climatizar con losas radiantes que, aunque pudiendo ser más eficientes, requerirían de una mayor intervención constructiva. En su lugar, se opta por el uso de ventilo-convectores o *fan coils*, que son unidades formadas por una o más baterías de tubos y aletas y un ventilador, que transmiten la energía mediante un sistema de ventilación forzada.

Para el dimensionamiento de estos equipos se recurre al catálogo de Productos ANWO de Aire Acondicionado Aplicado [39], cuyas fichas técnicas de interés se adjuntan como Anexo D. La Figura 4-30 muestra un *fan coil*.



Figura 4-30: Fan coil. Fuente: [39].

En base a los requerimientos de potencia para calor y frío ya calculados en las viviendas, se escoge el producto que más se adapte a lo exigido. En este caso, se hace necesario la instalación de un equipo por vivienda.

Entonces, considerando la demanda térmica de diseño para las estaciones de invierno y verano para cada vivienda según la Tabla 4-8, y la oferta disponible en el catálogo ANWO [39], se escogen las bombas de calor de acuerdo a su capacidad térmica y a su precio. La Tabla 4-24 muestra la selección de los equipos y el cálculo del costo de inversión para los casos con solo calefacción y con enfriamiento incluido.

Tabla 4-24: Dimensionamiento de fan coils.

Tipología de vivienda según superficie	45	50	56	61	Unidad
Demanda de calor	5,2	5,6	6,4	6,9	kW
Capacidad de <i>fan coil</i>	5.640	5.640	7.220	7.220	W
Consumo (Precio)	40 (307)	40 (307)	42 (327)	42 (327)	W (USD)
Demanda de frío	6,5	7,1	8,8	9,4	kW
Capacidad de <i>fan coil</i>	7.220	7.220	10.280	10.280	W
Consumo (Precio)	42 (327)	42 (327)	49 (380)	49 (380)	W (USD)
Inversión total solo calefacción	653.336				USD
Inversión total con enfriamiento	715.424				USD

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los resultados de la Tabla 4-24, la mayor demanda de energía en verano se traduce en una inversión en *fan coils* para un sistema que incluye enfriamiento de un 10% mayor que uno que solo calefacciona.

4.4.4. Ciclo Abierto

Se entiende por circuito abierto al sistema compuesto por los pozos de extracción, reinyección y el sistema de bombeo del agua subterránea.

4.4.4.1. Pozos

Los pozos de bombeo en sistemas geotermales no se diferencian mucho de aquellos que son usados para irrigación municipal o suministro de agua residencial. La Figura 4-31 muestra una vista de la sección transversal de un pozo típico.

La caracterización de los pozos para este caso se basará en la experiencia y resultados obtenidos del informe de construcción de cuatro pozos de captación que licitó la municipalidad de Puente Alto el año 2011 [41]. En dicho informe se especifica la siguiente información:

- Diámetro de revestimiento definitivo: 12”.
- Estanque de hormigón armado enterrado de 50 m³.
- Bombas del tipo sumergibles.
- Caudales de bombeo de producción entre 20 y 30 [l/s].

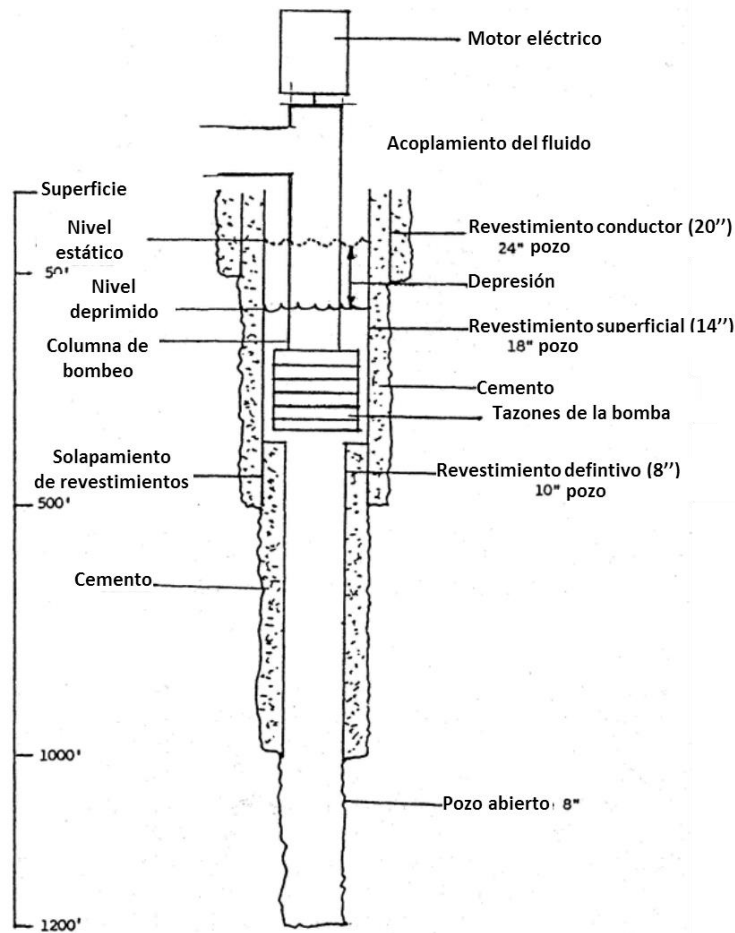


Figura 4-31: Detalles típicos de la construcción de un pozo geotermal. Fuente: Adaptado de [40].

Para determinar el costo de perforación de un pozo, si bien este depende de varios factores tales como condiciones del terreno, calidad del sedimento, profundidad de la perforación, entre otros, cabe esperarse que se ajuste al menos a un costo fijo más una componente variable, dependiente principalmente de la profundidad del pozo. De esa manera se presenta un modelo lineal del costo en función de la profundidad de perforación, determinado en base a los valores cotizados por la municipalidad de Puente Alto. La Tabla 4-25 resume dichos valores.

Tabla 4-25: Resumen de valores cotizados por Municipalidad.

Pozo	Valor Total [CLP]		Profundidad [m]
	Empresa 1	Empresa 2	
Sor Teresa	166.119.900	189.243.435	200
Estadio Municipal	159.019.105	193.336.143	180
Juan Éstay	159.482.080	135.747.461	150

Fuente: Adaptado de [41].

En base a los valores de la Tabla 4-25 se genera una línea de tendencia y se modela el costo de perforación en función de los metros de profundidad, como se ve en la Figura 4-32.

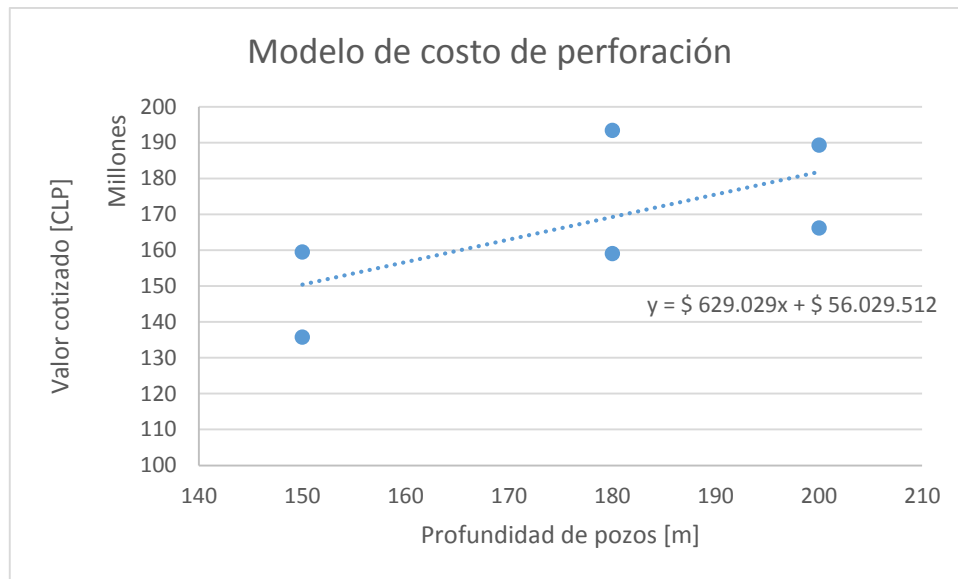


Figura 4-32: Modelo de costo de perforación. Fuente: Elaboración propia.

Obtenida la función del costo por perforación, se calcula el costo de la inversión por perforar los 16 pozos propuestos en este trabajo. La Tabla 4-26 muestra el valor estimado para cada uno de los pozos en función de su profundidad.

Tabla 4-26: Dimensionamiento de pozos.

Pozo Lote N°	Profundidad [m]	Costo por pozo extracción [CLP]	Costo por pozo reinyección [CLP]
1, 2, 7, 8, 9, 14, 15	110	125.222.702	125.222.702
3, 4, 12, 13	160	156.674.152	156.674.152
5, 6, 10, 11, 16	135	140.948.427	140.948.427
Total		4.415.995.314	

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4.2. Bombas Hidráulicas

Para bombear el agua desde el acuífero por medio de los pozos, se usarán bombas hidráulicas sumergibles de 50 HP, que debieran ser suficientes según la referencia Rafferty [40] en que se utiliza una bomba de estas características para levantar 500 gpm (31,5 l/s) desde 1100 ft (335 m) de profundidad, con un costo de \$15.000.000 CLP cada una [41]. La instalación eléctrica por su parte la valúan en \$10.000.000 por pozo [41]. Esto se traduce en un costo total de inversión por bombas hidráulicas sumergibles y costos de instalación eléctrica de \$400.000.000 CLP.

4.4.5. Red de Distribución Distrital

La red de distribución distrital es la encargada de transportar la energía intercambiada entre el ciclo abierto y las bombas de calor. Esta consiste en una red de tubos de transporte de agua que pasan por el intercambiador intermedio, recorren un circuito que pasa por todas las bombas de calor instaladas en las viviendas y se conectan a ellas de manera paralela, como se ve en el diagrama de flujo de la Figura 4-33.

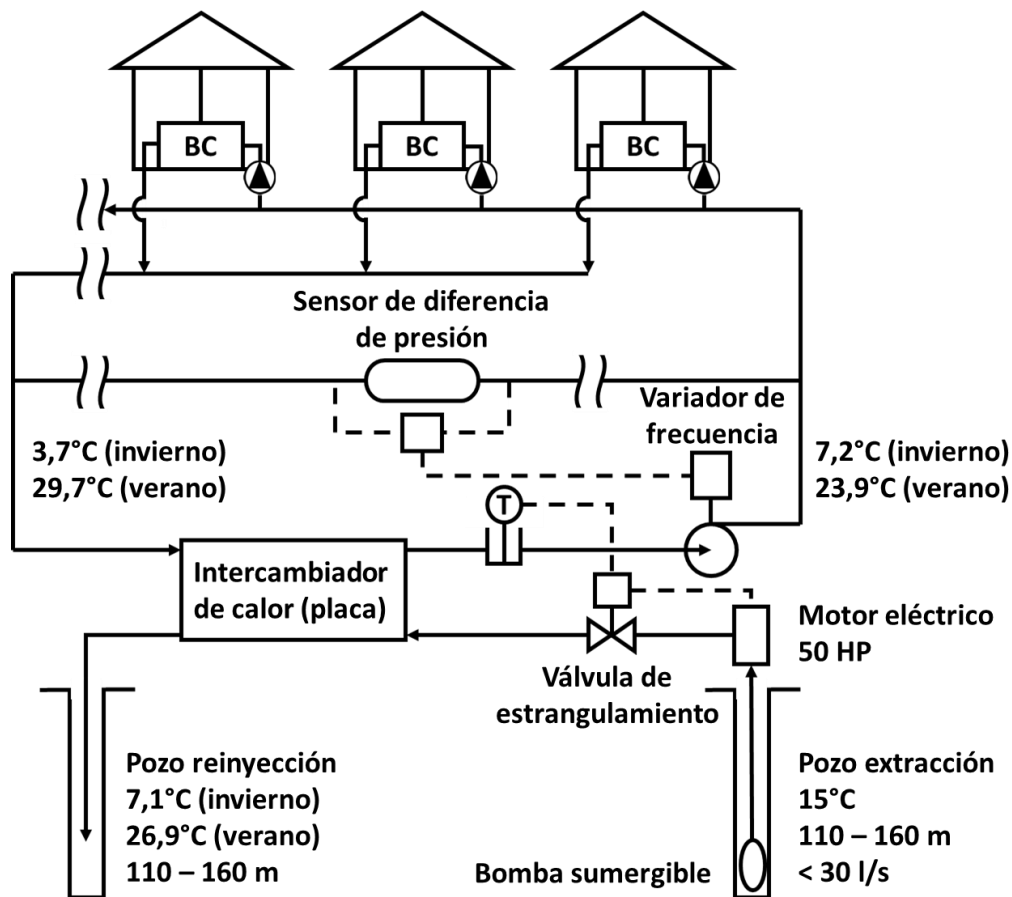


Figura 4-33: Diagrama de flujo red de distribución. Fuente: Elaboración propia.

Para simplificar la caracterización de la red de distribución en cada lote de viviendas del proyecto, se considerará el lote número 3 como un caso representativo de todos los sistemas definidos en el capítulo 4.2.2, por pertenecer al grupo de sistemas con mayor carga térmica de diseño.

La Figura 4-34 contiene la propuesta de red de distribución para el sistema número 3. En él se observa una red de suministro que sale desde el intercambiador de calor hacia las bombas de calor, y una red de retorno que se devuelve hacia el intercambiador de calor (tuberías de doble línea).

La materialidad que más se usa en este tipo de aplicaciones son tuberías pre-aisladas de hierro dúctil de doble línea (suministro y retorno). Con respecto al costo, Rafferty [42]

estima el precio total por redes de distribución para distintos diámetros de tuberías, como se ve en la Tabla 4-27. Estos valores incluyen costos por tuberías de hierro dúctil, zanja y relleno, soportes, accesorios y válvulas, instalación y sistemas de control.

Tabla 4-27: Costos de instalación de redes de distribución

Diámetro	3"	4"	6"	8"	10"	12"
Costo [USD/ft]	75,36	81,20	94,51	119,46	151,51	174,06

Fuente: Adaptado de [42].

Por su parte, las tuberías ramales que se conectan a las viviendas pueden ser de cobre aislado en terreno de 1" por un costo de \$23 USD/ft. En promedio, se considera un largo de tuberías de 60 ft (18,3 m) por casa (suministro y retorno), obteniéndose un costo de \$1380 USD por casa por conectarse a la red de distribución [42].

Entonces, en base al diagrama de la Figura 4-34 y a las estimaciones de costos de [42], se tienen, por lote, 970 m de tuberías troncales (suministro y retorno) y 1190 m de tuberías ramales (suministro y retorno). Además, como la red troncal tiene un trayecto prácticamente continuo, sin ramificaciones, se puede considerar que la disminución del diámetro de las tuberías se distribuye de igual manera conforme se avanza en la red. Por lo tanto, el largo total de tuberías troncales se divide en 6 tramos iguales, cuyos diámetros irán de 12" a 3", de acuerdo a las alternativas de la Tabla 4-27. La Tabla 4-28 indica el costo total de inversión por la red de suministro.

Tabla 4-28: Dimensionamiento de la red de suministro por lote.

Red	Largo [ft]	Largo [m]	Costo [USD]
Troncal 12"	530	162	92.322
Troncal 10"	530	162	80.361
Troncal 8"	530	162	63.362
Troncal 6"	530	162	50.128
Troncal 4"	530	162	43.069
Troncal 3"	530	162	39.971
Ramal 1"	3.900	1.189	89.700
Total	7.082	2.159	458.913
Total (x 16 lotes)	113.319	34.540	7.342.610

Fuente: Elaboración propia.

Cabe notar que para el modelo de estimación de costos anterior (Tabla 4-27), basado en casos de estudio en EEUU, la mano de obra representa una proporción considerable del costo. El salario mínimo en Chile es aproximadamente un 30% del salario mínimo en EEUU, por lo tanto, sería acertado esperar un menor costo en este ítem.

Si se utiliza el salario mínimo como factor de corrección, la red de suministro costaría, según [42], USD \$2.202.783.



Figura 4-34: Red de distribución distrital de un módulo representativo del condominio.
Fuente: Elaboración propia.

4.5. Evaluación Económica

A continuación se realiza la evaluación económica en base al dimensionamiento realizado en los capítulos anteriores y a costos de inversión, operación y ahorro observados en la bibliografía y en el mercado.

4.5.1. Inversión

La inversión inicial del proyecto consiste en la suma de los costos de los equipos ya descritos y trabajos de construcción e instalación.

Primero, vale la pena revisar estimaciones de costos de inversión según la literatura especializada en el tema.

El *Geo-Heat Center* (GHC) del Instituto Tecnológico de Oregón en EEUU es un centro especializado en geotermia que provee de asistencia e información acerca de sistemas geotermiales [43]. Los siguientes antecedentes son rescatados de distintas publicaciones y estudios de casos disponibles en su sitio web.

Un estudio de pre-factibilidad para la implementación de un sistema de bombas de calor geotérmicas en el Centro Cultural *Schitsu'umsh* en Plummer, Idaho en EEUU, señala que los costos típicos de inversión en proyectos de GSHP de ciclo abierto son los indicados en la Tabla 4-29.

Tabla 4-29: Costos típicos de un sistema GSHP de ciclo abierto

Costo típico de instalación mecánica y de plomería (Al interior del edificio)	11	USD/ft ² de superficie
Costo típico de instalación (Trabajo en suelo)	750	USD/ton de refrigeración

Fuente: Adaptado de [44].

Entonces, con los valores de la Tabla 4-29 se puede realizar una primera aproximación de la inversión del proyecto. La Tabla 4-30 muestra los resultados para cada módulo y el total del conjunto San Alberto de Casas Viejas, cuando se dimensiona solo para calefaccionar. La Tabla 4-31 estima los costos para un sistema que incluye enfriamiento en verano. El valor del USD se considera en \$625 CLP.

Tabla 4-30: Costo preliminar de inversión del proyecto según [44]. Solo calefacción.

Solo calefacción	Módulo A	Módulo B	Módulo C	Módulo D	Unidad
Potencia de diseño	652	722	792	869	kW
	185	205	225	247	TRF
Superficie	5.725	6.366	6.974	7.647	m ²
	61.623	68.523	75.068	82.312	ft ²
Costos al interior	677.857	753.754	825.743	905.428	UDS
Trabajo en suelo	139.058	154.031	168.891	185.410	USD
Total por módulo	816.916	907.784	994.634	1.090.838	UDS
Total proyecto (cada módulo x 4)	15.240.685				USD
	9.525.428.297				CLP

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-31: Costo preliminar de inversión del proyecto según [44]. Calefacción y enfriamiento.

Solo calefacción	Módulo A	Módulo B	Módulo C	Módulo B	Unidad
Potencia de diseño	869	951	1047	1.156	[kW]
	247	270	298	329	[TRF]
Superficie	5.725	6.366	6.974	7.647	[m ²]
	61.623	68.523	75.068	82.312	[ft ²]
Costos al interior	677.857	753.754	825.743	905.428	[UDS]
Trabajo en suelo	185.316	202.768	223.192	246.578	[USD]
Total por módulo	863.173	956.522	1.048.935	1.152.006	[UDS]
Total proyecto (cada módulo x 4)	16.082.542				[USD]
	10.051.588.934				[CLP]

Fuente: Elaboración propia.

Otro estudio de diseño realizado el año 2006 [45] propone una estimación de costos de construcción según se muestra en la Tabla 4-32. Aquí solo faltaría agregar al itemizado de inversión el valor de los *fan coils*, que en base a la lista de precios del año 2014 de la empresa ANWO [38] y al cálculo realizado en el capítulo 4.4.3 se puede estimar en 312 USD para un equipo que satisface la demanda de calor promedio de las viviendas en invierno, y en 343 USD para un equipo que satisface la demanda de frío en verano.

En base a los valores indicados en la Tabla 4-32 y a las características del proyecto, se hace una segunda estimación del costo de inversión, detallado en la Tabla 4-33 para el caso con solo calefacción, y en la Tabla 4-34 para el caso con enfriamiento incluido. Para el caso con enfriamiento aumenta la capacidad de los intercambiadores de calor, de las bombas de calor y de los *fan coils*.

Tabla 4-32: Estimativo de costos de construcción de un sistema GWHP de ciclo abierto según [45].

Sistema GWHP de ciclo abierto	Costo Unitario [USD/unidad]	Unidad
RECURSO GEOTÉRMICO		
Pozo de producción		
Perforación y Materiales	30	[ft]
Bomba hidráulica, tanque de presurización y controles.	2000	conjunto
Pozo de reinyección		
Perforación y Materiales	30	[ft]
Piping de distribución		
Tuberías de PVC, zanja y relleno, soportes, accesorios y válvulas.	20	[ft]
APROVECHAMIENTO DEL RECURSO		
Intercambiador de calor intermedio (de placas)	50	[TR]
Climatización		
Obras en paredes, tuberías y accesorios	1750	conjunto
Bomba de calor (agua-agua)	1500	[TR]
Bomba de circulación y controles	500	conjunto

Fuente: Adaptado de [45].

Tabla 4-33: Estimación del costo de inversión en base a [45]. Solo calefacción.

Sistema GWHP de ciclo abierto	Cantidad	Uni.	Subtotal	Uni.
RECURSO GEOTÉRMICO				
Pozo de producción				
Perforación y Materiales de 16 pozos	6.841	[ft]	205.217	[UDS]
	2.085	[m]		
Bomba hidráulica, tanque de presurización y controles	16	conj.	32.000	[UDS]
Pozo de reinyección				
Perforación y Materiales de 16 pozos	6.841	[ft]	205.217	[UDS]
	2.085	[m]		
Piping de distribución				
Tuberías de PVC, zanja y relleno, soportes, accesorios y válvulas. 16 módulos de 2.159 m cada uno	113.333	[ft]	2.266.667	[UDS]
	34.544	[m]		
APROVECHAMIENTO DEL RECURSO				
Intercambiador de calor intermedio (de placas). 4 de cada uno	2.736	[TR]	136.813	[UDS]
	9.623	[kW]		
Climatización				
Obras en paredes, tuberías y accesorios, por cada casa	2.088	conj.	3.654.000	[UDS]
Bomba de calor (agua-agua). 1 cada dos casas	3.505	[TR]	5.257.684	[UDS]
	12.327	[kW]		
Bomba de circulación y controles	2088	conj.	1.044.000	[UDS]
<i>Fan coils</i> . 1 por casa	2088	Conj.	651.456	[UDS]
Total			13.453.053	[UDS]
			8.408.157.915	[CLP]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-34: Estimación del costo de inversión en base a [45]. Calefacción y enfriamiento.

Sistema GWHP de ciclo abierto	Cantidad	Uni.	Subtotal	Uni.
RECURSO GEOTÉRMICO				
Pozo de producción				
Perforación y Materiales de 16 pozos	6.841	[ft]	205.217	[UDS]
	2.085	[m]		
Bomba hidráulica, tanque de presurización y controles	16	conj.	32.000	[UDS]
Pozo de reinyección				
Perforación y Materiales de 16 pozos	6.841	[ft]	205.217	[UDS]
	2.085	[m]		
Piping de distribución				
Tuberías de PVC, zanja y relleno, soportes, accesorios y válvulas. 16 módulos de 1624 m cada uno	113.333	[ft]	2.266.667	[UDS]
	34.544	[m]		
APROVECHAMIENTO DEL RECURSO				
Intercambiador de calor intermedio (de placas). 4 de cada uno	5.891	[TR]	294.539	[UDS]
	20.717	[kW]		
Climatización				
Obras en paredes, tuberías y accesorios, por cada casa	2.088	conj.	3.654.000	[UDS]
Bomba de calor (agua-agua). 1 cada dos casas	4.487	[TR]	6.730.877	[UDS]
	15.781	[kW]		
Bomba de circulación y controles	2088	conj.	1.044.000	[UDS]
<i>Fan coils</i> . 1 por casa	2088	Conj.	716.184	[UDS]
Total			15.148.699	[UDS]
			9.467.937.012	[CLP]

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4-30, Tabla 4-31, Tabla 4-33 y Tabla 4-34 se obtiene que los costos de inversión total de un proyecto de la envergadura que se propone en este trabajo está por sobre los 13 millones de dólares.

Con respecto al aumento en el costo cuando se incluye la capacidad de enfriar en verano, este es del orden de los 1,7 millones de dólares, equivalente al 11% del valor total de un sistema sin esta característica.

Al igual que en el capítulo 4.4.5, el modelo de estimación de costos anterior (Tabla 4-32), basado en casos de estudio en EEUU, considera un costo por mano de obra sobreestimado con respecto a Chile. Por lo tanto, sería acertado esperar un menor costo en los ítems de instalación de la red de distribución y obras en la vivienda.

Si se utiliza el salario mínimo como factor de corrección, la inversión del proyecto, según [45], sería de \$9.308.586 USD para el caso con solo calefacción y \$10.939.505 USD para el caso con enfriamiento incluido, lo que significa una disminución en torno al 30% de la estimación inicial.

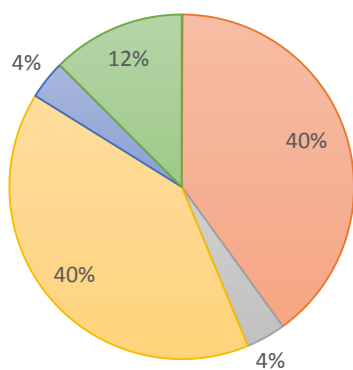
Ahora, la Tabla 4-35 muestra el costo total de la inversión según los valores estimados en el capítulo 4.4, y la Figura 4-35 representa la proporción de cada componente sobre el valor total de la inversión.

Tabla 4-35: Costo total de inversión.

Ítem	Solo calefacción [USD]	Con enfriamiento [USD]
Intercambiadores de calor	14.324	19.160
Bombas de calor	7.031.976	10.096.000
<i>Fan coils</i>	653.336	715.424
Pozos	7.065.593	7.065.593
Bombas hidráulicas	640.000	640.000
Red de distribución	2.202.783	2.202.783
Total	17.608.012	20.738.960

Fuente: Elaboración propia.

Costo de Inversión
Caso con solo calefacción



Costo de Inversión
Caso con enfriamiento

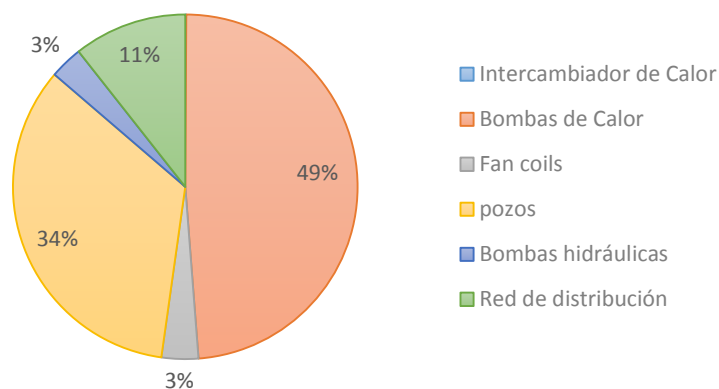


Figura 4-35: Distribución de costos de la inversión. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-36 resume los resultados obtenidos a partir de las tres estimaciones anteriores.

Tabla 4-36: Resumen de costo total de inversión

Ítem	Solo calefacción [USD]	Con enfriamiento [USD]
Estimación 1	15.240.685	16.082.006
Estimación 2	9.308.586	10.939.505
Estimación 3	17.608.012	20.738.960
Promedio	14.052.428	15.920.157
Desviación estándar	4.275.405	4.901.732

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la diferencia entre las distintas estimaciones, estas se encuentran en torno a 30% del promedio para el caso con solo calefacción, y al 31% para el caso con enfriamiento. Una diferencia de hasta un 30% en las estimaciones preliminares es propia de una etapa de ingeniería básica, por lo que el resultado obtenido entrega una estimación aceptable para el orden de magnitud del costo del proyecto.

Como antecedente, el valor promedio de las viviendas es de 959,4 UF, lo que al año 2015 equivaldría a 23,8 millones de pesos o 38.089 USD. En total, por las 2088 viviendas, el condominio cuesta 79,5 millones de dólares. Por lo tanto, el proyecto de climatización correspondería en promedio a un 19% del precio de las viviendas.

En base a los valores de la Tabla 4-36, el costo promedio de inversión por vivienda es de \$4.206.306 CLP para el caso con solo calefacción, y \$4.765.373 CLP para el caso con enfriamiento incluido.

Según la OECD/IEA [46] los costos de capital para sistemas GSHP son \$439-600 USD/kW_t para China e India, \$905-1.190 USD/kW_t para Norteamérica, y \$1.170-2.267 USD/kW_t en Europa. El costo de capital de este proyecto se estima entre los \$1.000 y \$1.400 USD/kW_t, situándolo en una categoría cara, comparable a un caso europeo. Esto se puede entender si se considera que la implementación de esta tecnología en el país aún no está muy desarrollada. Las aplicaciones exitosas que se citan en el capítulo 2.4 son de pequeña escala, con inversiones menores. Además, la depreciación sostenida del peso chileno y la necesidad de importar la mayoría de los componentes de este proyecto, hacen que la inversión pueda encarecerse aún más.

4.5.2. Consumo Anual

El consumo anual corresponde al costo que tiene hacer funcionar el sistema de climatización con bombas de calor geotérmicas en un año. Este se compone por los gastos en electricidad necesarios para operar los compresores de la bomba de calor, las bombas de circulación, los *fan coils* y los costos de mantenimiento.

Como una primera aproximación, la Agencia Internacional de Energía (OECD/IEA) [46] estima los costos de generación para sistemas GSHP en \$79 USD/MWh_t anual. Esto significaría un costo anual del condominio entero de \$213.193 USD para un sistema con solo calefacción, y \$669.746 USD para un sistema que integre enfriamiento.

4.5.2.1. Demanda Anual de Energía

Para determinar el gasto por consumo eléctrico primero es necesario calcular la demanda anual de energía por vivienda. Ya se calculó la potencia térmica de diseño en el capítulo 4.1, sin embargo, es necesario captar la variación de la carga térmica en función de la temperatura del aire exterior para integrar la energía consumida a lo largo de todo el periodo estudiado. Para hacer esto, se utiliza el método de frecuencia de temperaturas propuesto por RETScreen [6] llamado en inglés *Bin Method*, que consiste en sumar el número de horas en que se repite una cierta temperatura para formar una tabla de frecuencias. De esta manera es posible calcular la carga térmica particular de la vivienda para un espectro de temperaturas, utilizando el mismo método que en el capítulo 4.1, y multiplicarla por el número de horas que se repite dentro de un periodo determinado. Así, se obtiene la demanda energética, como se ve en el ejemplo de la Tabla 4-37.

Tabla 4-37: Ejemplo del cálculo de demanda energética.

Bin [°C]	Frecuencia Julio [h]	Carga vivienda tipo 45 [kW]	Demanda Julio [kWh]
...
9	51	2,9	148
10	62	2,1	130
...

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario, entonces, generar la tabla de frecuencia para las estaciones de invierno (junio, julio y agosto) y verano (diciembre, enero y febrero). Para esto se accede a la base de datos del registro histórico de temperatura del aire de la Dirección General de Aguas de los años 2013, 2014 y 2015 [47]. Luego, se definen *bins* de temperatura cada un grado, desde los 0°C (temperatura de diseño en invierno) hasta los 31°C (temperatura de diseño en verano), y se cuentan las horas en que se repite cada temperatura durante los meses de interés y en los intervalos de tiempo [6 A.M. - 12 P.M., 6 P.M. - 12 A.M.] para el invierno y [11 A.M. - 17 P.M.] para el verano. La tabla de frecuencia generada puede ser revisada en el Anexo E.

Además, es necesario saber las temperaturas bajo y sobre las cuales el sistema de climatización no opera en verano e invierno respectivamente. Estas temperaturas son llamadas temperaturas de balance y corresponden a las raíces de la ecuación (4-1). La Figura 4-36 contiene las curvas de carga térmica para cada tipología de vivienda a

distintas temperaturas del aire exterior. La tabla con los valores usados para graficar dichas curvas se pueden encontrar en el Anexo F.

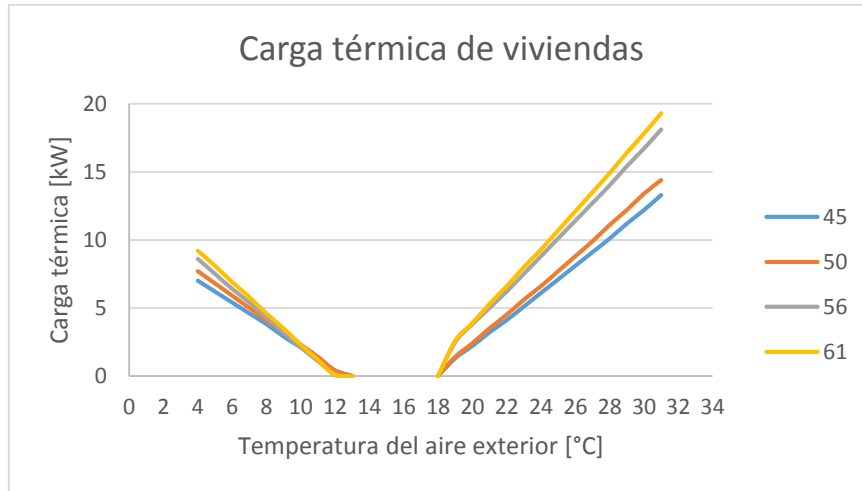


Figura 4-36: Carga térmicas de las distintas tipologías de vivienda según temperatura del aire exterior. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4-36 se puede ver que las temperaturas de balance se encuentran en torno a los 13°C en invierno y a los 18°C en verano.

Por lo tanto, habiéndose determinado los *bins* de temperatura con la frecuencia en horas, la carga térmica en función de la temperatura del aire exterior y las temperaturas de balance, es posible calcular la demanda energética para las estaciones de invierno y verano. La Tabla 4-38 resume la demanda energética anual para cada tipología de vivienda, por cada par de casas. El detalle del cálculo puede ser revisado en el Anexo G.

Tabla 4-38: Demanda energética anual por par de viviendas.

Tipología	45	50	56	51	Unidad
Horas de operación invierno	832	832	832	832	h
Demanda anual invierno	2.391	2.603	2.628	2.839	kWh
Horas de operación verano	520	520	520	520	h
Demanda anual verano	4.734	5.165	6.600	7.019	kWh
Total demanda anual	7.124	7.768	9.228	9.858	kWh

Fuente: Elaboración propia.

4.5.2.2. Consumo eléctrico

El gasto en consumo eléctrico por el funcionamiento del sistema se compone por el consumo de las bombas de calor, los *fan coils* y las bombas hidráulicas. El consumo energético anual de las bombas de calor se calcula por medio de las ecuaciones (2-1) y (2-2) para calefacción y enfriamiento respectivamente, multiplicando la demanda energética por el COP respectivo. Por su parte, el consumo de los *fan coils* se calcula multiplicando la potencia de consumo por el número de horas de funcionamiento, al igual

que el consumo de las bombas hidráulica. Se considera el precio de la electricidad en 90 CLP/kWh. La Tabla 4-39 indica el gasto anual en electricidad por vivienda según tipología.

Tabla 4-39: Gasto anual en electricidad por vivienda.

Tipología de vivienda	45	50	56	61	Unidad
Invierno					
Demanda anual por vivienda	1.196	1.302	1.314	1.420	kWh
COP _c	4,6	4,6	4,6	4,6	-
Potencia de consumo <i>fan coil</i>	41	41	41	41	W
Horas de operación anual	832	832	832	832	h
Consumo anual por vivienda	293	316	321	344	kWh
Costo anual por vivienda	26.385	28.459	28.854	30.918	CLP
Verano					
Demanda anual por vivienda	2.367	2.583	3.300	3.510	kWh
COP _r	3,2	3,2	3,2	3,2	-
Potencia de consumo <i>fan coil</i>	42	42	49	49	W
Horas de operación anual	520	520	520	520	h
Consumo anual por vivienda	762	829	1.057	1.122	kWh
Costo anual por vivienda	68.537	74.598	95.106	100.998	CLP
Bombas sumergibles					
Potencia					50 (37) HP (kW)
Consumo verano (16 bombas / 2088 casas)					149 kWh
Consumo invierno (16 bombas / 2088 casas)					238 kWh
Costo anual verano					13.371 CLP
Costo anual invierno					21.394 CLP
Resumen de costos					
Total invierno	47.779	49.853	50.248	52.312	CLP
Total verano	81.909	87.970	108.477	114.369	CLP
Total anual	129.688	137.823	158.724	166.681	CLP

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 4-39 se traducen en un costo mensual promedio de \$16.584 CLP en calefacción, durante tres meses de invierno, y de \$31.095 CLP en refrigeración, durante tres meses de verano. El costo anual para el total de las viviendas de San Alberto de Casas Viejas es de \$166.106 USD para un sistema con solo calefacción, y \$477.737 USD para un sistema que integre enfriamiento. Estos costos equivalen en torno al 75% de las estimaciones propuestas por la OECD/IEA [46], lo cual es propio de una evaluación de ingeniería básica.

4.5.2.3. Costos de Mantenimiento

Según la OECD/IAE [46] los costos de Operación y Mantenimiento (O&M) para sistemas GSHP son muy bajos, y de acuerdo a lo observado en los estudios de casos del GHC [44] estos pueden ser despreciados.

4.5.3. Ahorro Anual

Debido a que la implementación de esta propuesta generaría un nivel de confort térmico muy superior a las condiciones de vida que actualmente tienen las familias, se hace impracticable la comparación económica entre ambas situaciones. Sin embargo, se hace relevante la comparación económica de un sistema de climatización por geotermia con otro sistema de climatización alternativo.

Por lo tanto, se entiende por ahorro la diferencia entre el gasto potencial en climatización de las viviendas por métodos convencionales alternativos, menos el gasto en climatización con el sistema geotérmico.

Para determinar el gasto potencial en climatización de las viviendas por métodos convencionales alternativos, se consideran las opciones que promueve el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) para enfriar y calefaccionar las viviendas en su “guía de calefacción sustentable” [48], y que se resumen en la Tabla 4-40, de acuerdo a los resultados obtenidos en la “calculadora de calefacción” [48] para los casos correspondientes a las viviendas de San Alberto de Casas Viejas cuando se satisface la totalidad de su demanda térmica.

Tabla 4-40: Consumo mensual potencial por métodos convencionales alternativos y por tipología de casa.

Sistema de climatización	Tipología de vivienda					Unidad
	45	50	56	61	Promedio	
Split A/C Frio	71.000	77.500	99.000	105.000	83.031	CLP
Split A/C Calor	37.000	39.000	42.000	44.000	39.648	CLP
Gas natural de tiro forzado	69.000	74.000	79.000	84.000	74.881	CLP
Pellet de madera	59.000	63.000	68.000	72.000	64.000	CLP

Fuente: Elaboración propia en base a [48].

Con los resultados obtenidos del consumo anual en electricidad de la Tabla 4-39, considerando un invierno de tres meses y un verano de tres meses, y el consumo mensual potencial por métodos convencionales alternativos de la Tabla 4-40, se genera la Tabla 4-41 que resume el cálculo del ahorro mensual y su porcentaje para cada tipología de vivienda.

Finalmente, la Tabla 4-42 muestra el ahorro anual para cada tipología de vivienda y método convencional alternativo de climatización.

Tabla 4-41: Ahorro mensual por tipología de casa y para los métodos alternativos de climatización.

Sistema de climatización	Tipología de vivienda					Unidad
	45	50	56	61	Promedio	
Split A/C Frio	43.697 (62%)	48.177 (62%)	62.841 (63%)	66.877 (64%)	51.935 (62%)	CLP (%)
Split A/C Calor	21.049 (57%)	22.357 (57%)	25.276 (60%)	26.588 (60%)	23.063 (58%)	CLP (%)
Gas natural de tiro forzado	53.049 (77%)	57.357 (78%)	62.276 (79%)	66.588 (79%)	58.297 (78%)	CLP (%)
Pellet de madera	43.049 (73%)	46.357 (74%)	51.276 (75%)	54.588 (76%)	47.416 (74%)	CLP (%)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-42: Ahorro anual por tipología de casa y para los métodos alternativos de climatización.

Sistema de climatización	Tipología de vivienda					Unidad
	45	50	56	61	Promedio	
Split A/C Frio	131.091 (210)	144.530 (231)	188.523 (302)	200.631 (321)	155.806 (249)	CLP (USD)
Split A/C Calor	63.146 (101)	67.072 (107)	75.827 (121)	79.763 (128)	69.189 (111)	CLP (USD)
Gas natural de tiro forzado	159.146 (255)	172.072 (275)	186.827 (299)	199.763 (320)	174.891 (280)	CLP (USD)
Pellet de madera	129.146 (207)	139.072 (223)	153.827 (246)	163.763 (262)	142.247 (228)	CLP (USD)

Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Factibilidad Económica

La factibilidad económica del proyecto se evalúa, en primer lugar, observando el ahorro anual que percibirían las familias al implementar el sistema de climatización por geotermia, en comparación a otro sistema convencional alternativo. De la Tabla 4-41 se obtiene que la implementación de un sistema de climatización por bomba de calor genera, en promedio, un ahorro de más del 58% con respecto al gasto de cualquiera de los sistemas convencionales propuestos por la guía de calefacción sustentable del MMA.

Luego, corresponde analizar el costo de capital y si el ahorro es suficiente para recuperar la inversión en un tiempo razonable. El tiempo de retorno de la inversión se calcula dividiendo la diferencia entre el costo de inversión (CI) de las dos alternativas que se desean comparar, sobre el ahorro anual relativo entre las mismas dos alternativas, tal como se indica en la ecuación (4-37), donde CA es el consumo anual.

$$\text{Recuperación de la inversión} = \frac{CI_A - CI_B}{CA_A - CA_B} \quad (4-37)$$

Según la guía de calefacción sustentable [48], los costos de inversión e instalación de las tres alternativas estudiadas se muestran en la Tabla 4-43.

Tabla 4-43: Costos de inversión e instalación de los métodos alternativos de climatización.

Costo	Split A/C	Gas natural de tiro forzado	Pellet de madera	Unidad
Compra	300.000 - 949.990 (480 - 1.520)	380.000 (608)	499.990 - 2.266.900 (800 - 3.627)	CLP (USD)
Instalación	135.000 (216)	80.000 (128)	80.000 (128)	CLP (USD)
Total	435.000 - 1.084.990 (696 - 1.736)	460.000 (736)	579.990 - 2.346.900 (928 - 3.755)	CLP (USD)

Fuente: Elaboración propia en base a [48].

A continuación se calcula la recuperación de la inversión para tres escenarios distintos, descritos en la Tabla 4-44.

Tabla 4-44: Descripción de escenarios de evaluación del retorno de la inversión.

Escenario	Costo capital Sistema bomba de calor	Costo capital Sistema alternativo	Descripción
I	Máximo	Mínimo	Pesimista
II	Promedio	Promedio	Promedio
III	Mínimo	Máximo	Optimista

Fuente: Elaboración propia.

Según los escenarios de la Tabla 4-44, los valores de capital del sistema con bomba de calor de la Tabla 4-36, los valores de capital de los sistemas alternativos de la Tabla 4-43, y el ahorro anual con respecto a cada sistema alternativo de la Tabla 4-42, se obtiene el retorno de la inversión para los distintos escenarios calculado en la Tabla 4-45.

Tabla 4-45: Cálculo del retorno de la inversión para distintos escenarios y sistemas alternativos de climatización.

Sistema de climatización	Aplicación	Escenario			Unidad
		I	II	III	
Split A/C c/ frío	Invierno y verano	26	18	10	años
Split A/C s/ frío	Invierno	73	50	27	años
Gas natural de tiro forzado	Invierno	29	21	14	años
Pellet de madera	Invierno	33	19	4	años

Fuente: Elaboración propia.

Según [8], el tiempo de retorno de la inversión para sistemas GSHP se encuentra típicamente entre los 6 y 20 años, dependiendo del costo de capital, precios de la energía y su inflación.

De la Tabla 4-45 se obtiene que, para un escenario promedio, la inversión del proyecto se recupera en un periodo límite si se compara con un sistema de aire acondicionado que funcione tanto en invierno como en verano, o con una estufa a pellets de madera que calefaccione en invierno. Si se analiza un escenario optimista, la inversión se recupera en solo 4 años cuando se compara con la estufa a pellets, 10 años si se compara con un sistema de aire acondicionado frío/caliente, y 14 años si se hace con una estufa a gas natural de tiro forzado.

Un escenario optimista es posible si se toman en cuenta ciertos aspectos que puedan reducir el costo de inversión inicial del proyecto:

- Economías de escalas en los principales aportes: pozos, bombas de calor y otros equipos. Es de esperarse que el costo unitario de perforar 16 pares de pozos sea menor que cuando se perforan solo dos; así también cuando se adquieren 1044 bombas de calor en vez de una.
- Ahorro en mano de obra: probablemente, los habitantes del condominio calificados estarían dispuestos a participar en las obras de construcción e instalación del proyecto, cuyo proceso favorecería además la cohesión social de la comunidad.

Por otro lado, para cualquier escenario pesimista, el tiempo de recuperación de la inversión excede la cantidad esperada. Además, se debe considerar que aun cuando el tiempo de retorno de la inversión sea razonable cuando se compara con una alternativa como una estufa a pellets de madera, la complejidad de movilizar a 2088 familias a favor de este proyecto es elevada, y difícilmente todas estarían dispuestas a asumir el costo. Entonces, se hace necesario plantear alternativas necesarias para justificar una inversión de esta envergadura. A continuación se listan dos posibles soluciones, que no son taxativas ni mutuamente excluyentes:

- Considerar el proyecto como de interés social, debido a sus beneficios sociales y científicos (medio ambiente, salud, justicia social, innovación tecnológica, etc.) y subsidiar su inversión desde organismos estatales, municipales o internacionales.
- Reducir el costo de inversión, enfocándose en disminuir los costos por perforación y compra de bombas de calor, ya que ambas representan en torno al 40% del costo de capital inicial.

Con respecto a la primera propuesta, se hace necesario realizar un análisis de las externalidades del proyecto para evaluar los costos y beneficios sociales que promuevan un análisis social que justifique el subsidio.

Con respecto a la disminución del valor de la inversión, se agrega un capítulo con propuestas más concretas que podrían apuntar a ese objetivo.

4.6. Evaluación Social

Por evaluación social se entenderá la mención de externalidades derivadas de la implementación del proyecto. Estas se pueden considerar como los efectos sobre el medio ambiente, la salud y un desarrollo urbano más equitativo.

Con respecto a las externalidades sobre el medio ambiente, Omer [9] presenta una tabla comparativa de distintos sistemas de calefacción y las emisiones de CO₂ asociadas a cada una (Tabla 4-46).

Tabla 4-46: Comparación de distintos sistemas de calefacción

Sistema	Eficiencia	Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /kWh _t)
Caldera a petróleo	60-65	0,45-0,48
Calderas a gas	70-80	0,26-0,31
Caldera de condensación a gas + sistema de baja temperatura	100	0,21
Calefactores eléctricos	36	0,9
GSHP + electricidad convencional	120-160	0,27-0,20
GSHP + electricidad "verde"	300-400	0,00

Fuente: Adaptado de [9].

Según la Tabla 4-46, un sistema de bombas de calor geotérmicas con suministro eléctrico convencional como el que se propone en este trabajo pertenece al grupo con menos emisiones de CO₂ a la atmósfera, y con el potencial de lograr las 0 emisiones si se complementa con una fuente de energía eléctrica renovable no convencional.

También, la implementación de un sistema eficiente de calefacción libre de contaminación tiene un efecto beneficioso en la salud de la población. Según Oyarzún [49], los contaminantes atmosféricos contribuyen en la disminución de la función pulmonar y al aumento de la reactividad bronquial, disminuyen la tolerancia al ejercicio y aumentan el riesgo de bronquitis obstructiva crónica, enfisema pulmonar, exacerbación del asma bronquial y cáncer pulmonar, entre otros efectos que son responsables de contribuir al aumento de la mortalidad general, de la mortalidad infantil, de la mortalidad de los mayores de 65 años y de las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y cardíacas.

En particular, con respecto a la contaminación intradomiciliaria, a pesar de que el aire atmosférico se difunde y distribuye en forma más homogénea afectando en forma más o menos similar a los miembros de una población, la calidad del aire intradomiciliario es muy dependiente del nivel socio-económico de los moradores. Las principales fuentes de contaminación del aire intradomiciliario son el tabaquismo, la quema inadecuada de combustibles, el hacinamiento, y la convivencia y cohabitación con animales domésticos

[49]. Por una parte, la contaminación por humo de la combustión de leña genera una gran cantidad de compuestos orgánicos parcialmente oxidados. Las partículas ultrafinas ($< 0,1 \mu\text{m}$) que se generan logran traspasar fácilmente la barrera mucociliar, depositarse en bronquiólos y alvéolos y pasar directamente a la sangre. También, como derivados de la combustión de artefactos domésticos a gas propano, natural o kerosene se encuentran las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Los efectos nocivos del CO se deben a la hipoxia que se produce por el desplazamiento del O₂ y que resultan en cefalea e irritabilidad a compromiso de conciencia progresiva y muerte por hipoxia; mientras que las manifestaciones clínicas del CO₂ son hiperventilación, sudoración, cefalea, aumento de la temperatura cutánea y compromiso gradual de conciencia.

Por lo tanto, el fomento en el uso de una alternativa a la calefacción como la que se propone en este trabajo apunta al mejoramiento de las condiciones del ambiente intradomiciliario y en reducir la tasa de morbilidad, mortalidad y hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y cardíacas.

Por último, dotar a la población con un sistema de calefacción eficiente, que genere un ahorro en el costo energético de los sectores bajos y medios de la población, y equilibre las condiciones de confort térmico de manera transversal, apunta en el objetivo de impulsar ciudades más equitativas, sustentables e integradas socialmente, que es parte de la Política de Desarrollo Urbano del Ministerio de la Vivienda [5].

4.7. Aspectos por Mejorar

Una alternativa que podría resultar en economías de escala, con un mayor beneficio en la inversión y en el consumo, es la instalación de un menor número de bombas de calor, aunque más potentes, asociadas a un estanque de almacenamiento térmico. Este podría suministrar de energía a una mayor cantidad de viviendas, y además permitiría que la bomba de calor funcione permanentemente en su capacidad nominal, mejorando su rendimiento y aprovechando el exceso de calor en horas de menor demanda en la red de agua caliente sanitaria (ACS) (Figura 4-37).

Otra alternativa sería acondicionar las viviendas térmicamente y mejorar su hermeticidad al aire para que la demanda disminuya y se requiera de bombas de calor menos potentes y más baratas.

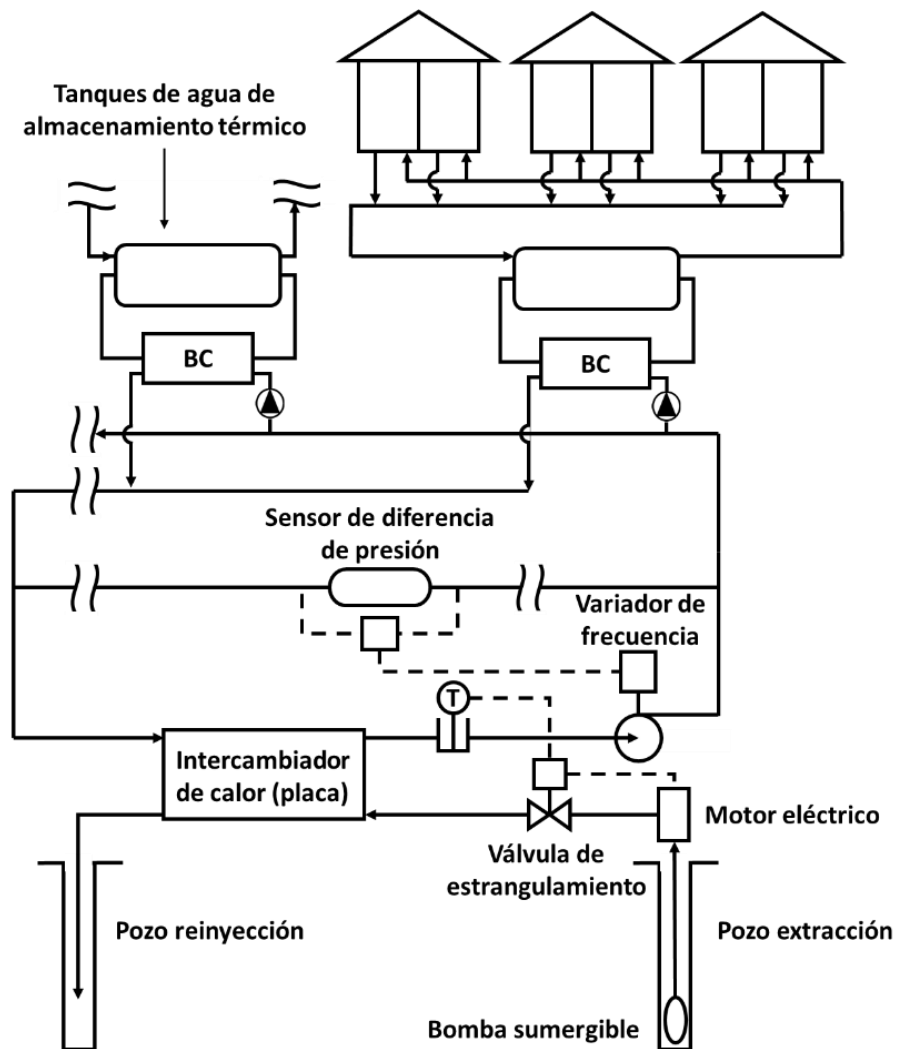


Figura 4-37: Diagrama de flujo red de distribución con tanques de almacenamiento térmico. Fuente: Elaboración propia.

Según la estimación de [45] y de acuerdo al posible ahorro energético obtenido en el capítulo 4.1.9, disminuir la demanda térmica de invierno a un 66% de la demanda actual calculada, y la de verano a un 83%, reduce el costo total de la inversión en un 20% en el caso de un sistema de calefacción, y en un 10% en el caso de un sistema con refrigeración. Además, habría efectos sobre el ahorro en el gasto anual por calefacción. Se calcula que el gasto en electricidad se reduciría en un 17% para calefaccionar, y en un 14% para refrigerar.

Por otro lado, para combatir el excesivo costo de perforación se podría reducir el número de pozos, a costa de ampliar el número de viviendas por lote. Por ejemplo, a modo de un cálculo simple, si se emparejaran los lotes del módulo A con los del módulo D, y los lotes del módulo B con los del módulo C, la tasa de bombeo de agua desde el acuífero aumenta en promedio a 34 [l/s] en invierno, y a 51,9 [l/s] en verano. Si solo se considera la opción de calefaccionar en invierno, la tasa de bombeo máxima alcanzaría a ser cubierta por la disponibilidad del acuífero, y se lograría reducir el número de sistemas de pozos a la

mitad. Esto se traduciría en un ahorro del 22% en el costo total de la inversión.

Si se consideraran todas las mejoras anteriores, el costo promedio de la inversión del proyecto podría disminuir a \$9,2 millones de dólares para el caso con solo calefacción, y a \$9,6 millones de dólares para el caso con refrigeración. Esto se traduce a un costo promedio por casa de \$2,8 millones de pesos para el caso con solo calefacción, y \$2,9 millones de pesos para el caso con refrigeración.

La recuperación de la inversión en este nuevo escenario se calcula en la Tabla 4-47.

Tabla 4-47: Calculo del retorno de la inversión para distintos escenarios y sistemas alternativos de climatización cuando se ahorra en la inversión inicial.

Sistema de climatización	Aplicación	Escenario			Unidad
		I	II	III	
Split A/C c/ frio	Invierno y verano	20	12	5	años
Split A/C s/ frio	Invierno	42	27	12	años
Gas natural de tiro forzado	Invierno	18	13	8	años
Pellet de madera	Invierno	21	9	0	años

Fuente: Elaboración propia.

El resultado obtenido en la Tabla 4-47 es prometedor, sin embargo, representa una estimación preliminar e hipotética de lo que podría significar un ahorro considerable en el capital de inversión del proyecto. Para lograr dicho objetivo se requiere profundizar más en la propuesta y aprovechar la oportunidad para desarrollar su ejecución en modo piloto, tal vez en una menor escala, que solo considere, por ejemplo, uno o pocos lotes en todo el condominio.

Una fase experimental del proyecto tendría una fuerte componente de carácter investigativo, donde la información que pueda ser rescatada sea más relevante que la propia rentabilidad privada de la iniciativa. Por un lado, podrían buscarse y encontrarse alternativas tecnológicas de uso de geotermia de baja entalpía de menor costo. Por otro lado, podría estudiarse y caracterizar el impacto social que el proyecto pueda tener, su efecto sobre la integración social, sobre la salud de la población y, por supuesto, su impacto ambiental.

Por último, con respecto al modelo de la anomalía termal en el acuífero, se propone complejizar el estudio implementando una variación temporal del caudal de extracción y reinyección en función de la demanda variable de energía de las viviendas. También, se pueden considerar variaciones en el dominio del modelo, para suponer una composición heterogénea del acuífero. De esta manera, se obtendría un resultado más cercano a la realidad y no tan sobreestimado.

5. Conclusiones

Respecto a los resultados de los capítulos anteriores:

- La solución a la climatización de los hogares propuesta en esta memoria es técnica, económica y socio-ambientalmente factible, dado que se conserva la sustentabilidad del recurso energético (acuífero), es económicamente competitiva con otras tecnologías convencionales de climatización promovidas por el gobierno, y es una tecnología que no contamina, favorece a la salud de la población y mejora sustancialmente la calidad de vida y confort térmico de, por lo menos, 8.000 personas de bajos y medios recursos.
- Se encontró la configuración de los sistemas de pozos más adecuada con tal de que las TAZs no afecten las zonas de captación de agua de los pozos vecinos, ni a la eficiencia del sistema en su conjunto. La proyección sirve como un plan regulador para quienes quieran implementar de manera parcial el proyecto, sin afectar el recurso geotérmico de futuras instalaciones.
- Se estima un costo total del proyecto en torno a los \$14 millones de dólares cuando solo se usa para calefaccionar en invierno. Implementar la refrigeración en verano no representa un desafío tecnológico por sobre no hacerlo, aunque significa un aumento en el capital de inversión de entre un 6% y un 18%, y un aumento en el consumo anual de operación de casi 3 veces. La mayor parte de la inversión se constituye por la perforación de los pozos, compra de bombas de calor y red de distribución distrital.
- Si se compara la propuesta con otras alternativas tecnológicas de climatización promovidas actualmente por el gobierno, el tiempo de retorno de la inversión cae dentro del rango típico de 6 a 20 años. En el mejor escenario, la inversión se recupera después de 4 años si se compara con una estufa a pellets de madera, y en el caso menos favorable, se recupera tras 18 años si se compara con un sistema de aire acondicionado que funcione tanto en invierno como en verano.
- Debido al alto valor de la inversión y a un nivel de incertidumbre en la estimación de costos propio de una etapa de ingeniería básica, aún existe la posibilidad, en un escenario pesimista, que la evaluación privada del proyecto no sea factible. Sin embargo, es posible reducir los costos de inversión por medio de mejoras tecnológicas que aprovechen las economías de escala y optimicen el uso del recurso geotérmico con tal de alcanzar costos de inversión accesibles a la comunidad.

Por último, los beneficios sociales y ambientales que tendría este proyecto son muy relevantes a la hora de evaluar socialmente la propuesta, y generan una oportunidad de innovación y desarrollo que podrían justificar la ejecución de un proyecto piloto a menor escala.

6. Bibliografía

- [1] Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2015). Balance nacional de energía. Energía Abierta. <http://energiaabierta.cne.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- [2] International Energy Agency. (2015). Recent Energy Trends in OECD. IEA Statistics. <http://www.iea.org/statistics/topics/energybalances/>.
- [3] Ministerio de Energía. (2014). Campaña de Eficiencia Energética “Cuando usas bien la energía, ganas tú y ganamos todos”. <http://www.minenergia.cl/ganamostodos/>.
- [4] Lo Ruso S., Gnavi L., Rocchia E., Taddia G., Verda V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature. *Geothermics* 51, 103-112.
- [5] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014). Política Nacional de Desarrollo Urbano: Ciudades Sustentables y Calidad de Vida (Vol. 4). Santiago de Chile.
- [6] RETScreen International. (2005) Ground-source Heat Pump Project Analysis, Natural Resources Canada’s Renewable Division, ISBN 0-662-39150-0, Cat. No. M39-110/2005E-PDF Ottawa, ON, Canada.
- [7] Morata D., Rojas J. (2014) Usos directos de la geotermia. Curso de Geotermia, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- [8] Self S. J., Reddy B. V., Rosen M. A. (2013) Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy* 101, 341-348.
- [9] Omer, A. M., (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewables and Sustainable Energy Reviews* 12, 344-371.
- [10] Vasca, P. (2014). Análisis sustentable de un Conjunto Habitacional construido como proyecto de Integración Social. Diplomado Arquitectura Sustentable. Santiago de Chile.
- [11] Maturana B. (s.f.). Viviendas de Integración Social y Sustentabilidad Medioambiental: una investigación de dos proyectos claves en Chile. Obtenido de <http://www.viviendasintegracion.com/#!/san-alberto-de-casas-viejas/c150i>
- [12] Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes. Geotermia en Chile. Universidad de Chile.

<http://www.cega.ing.uchile.cl/cega/index.php/es/informacion-de-interes-geotermia-en-chile>.

- [13] Lahsen, A. (1988). Chilean Geothermal Resources and their possible utilization. *Geothermics* 17, 401-410.
- [14] Custodio, E. y Llamas, M.R., (1983). *Hidrología subterránea*, editorial Omega. Volumen I y II. Barcelona.
- [15] CONHAB, GEVECON. (2009). *Presentación Tipologías de Viviendas Proyecto San Alberto de Casas Viejas*. Puente Alto. Santiago, Chile.
- [16] Lund, J. W. y Boyd, R. L. (2015). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review*. Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology. Klamath Falls, Oregon, EEUU.
- [17] Centro del Excelencia en Geotermia de los Andes. *Usos de la Geotermia en Chile*. Universidad de Chile. <http://www.cega.ing.uchile.cl/cega/index.php/es/component/content/article/219>.
- [18] Programa País Eficiencia Energética (PPEE) y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. (2008). *Proyecto Fomento de la Eficiencia Energética*. Gobierno de Chile.
- [19] EnergyPlus Energy Simulation Software, US Energy Efficiency & Renewable Energy Department. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [20] DECON UC. (2015). *Curso Evaluadores Energéticos. Sistema de calificación energética vivienda (SCEV)*. Santiago.
- [21] Instituto Nacional de Normalización (INN) (2007). *Norma Chilena 853 de Acondicionamiento térmico – Envoltorio térmico de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*.
- [22] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2006). *Manual de aplicación de reglamentación térmica*. Santiago.
- [23] ASHRAE (1985). *Handbook, Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA, USA.
- [24] ASHRAE (2005). *Handbook, Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA, USA.

- [25] Bobadilla, A. (2015). Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones. Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC UBB), Dirección de Extensión en Construcción (DECON UC), Chile.
- [26] Taivo, M. (2015). Evaluación de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en una Vivienda Social Tipo para la Incorporación del Impacto de Cambio Climático a la Reglamentación Térmica Nacional. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- [27] FEFLOW Finite Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. MIKE Powered by DHI-WASY. Berlin, Germany. <http://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow/>
- [28] Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L., Morata, D. and Parada, M. A. (2015). Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin Chile (33.5°S), *Renewable Energy*, 76, 186-195.
- [29] Morales (2002). Definición de acuíferos en la cuenca del Río Maipo. Trabajo de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- [30] Yañez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V., Bosch, A. (2015). Gravity derived depth to basement in Santiago basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geohazards. *Andean Geology*, 42, 147-172.
- [31] Perera F. (2014). Modelo predictivo de la zona de afectación térmica (TAZ) en un sistema geotérmico de bomba de calor de agua subterránea (GWHP): Maipú (Santiago de Chile) 33,5°S. Trabajo de grado, Universidad de Barcelona, Universidad de Chile, Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, Santiago.
- [32] Lienau, P.J. y Lunis, B.C. (1991). *Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook*. Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology. Klamath Falls, Oregon, EEUU.
- [33] Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Ganic, E.N. (1985). *Handbook of Heat Transfer Applications*, 2nd Edition, Mc. Graw Hill, EEUU.
- [34] Geo-Heat Center (GHC). (1994). *Reference Book on Geothermal Direct Use*. Oregon Institute of Technology. Klamath Falls, Oregon, EEUU.

- [35] Hulbert, G. (1986). Plate Heat Exchangers. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. Geo-Heat –Center, Oregon Insitute of Technology. Klamath Falls, Oregon, EEUU.
- [36] Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., West, R. E. (2003). Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 5th Edition, Mc. Graw Hill, EEUU.
- [37] ANWO. (2013). Catálogo de Productos de Eficiencia Energética. <http://www.anwo.cl/utilidades.html>
- [38] ANWO. (2014). Lista de Precios 2014. <http://www.anwo.cl/utilidades.html>
- [39] ANWO. (2013). Catálogo de Productos de Aire acondicionado Aplicado. <http://www.anwo.cl/utilidades.html>
- [40] Rafferty, K.D. (1990). An overview of U.S. geothermal district heating systemes. ASHRAE Transactions (Vol. #96, Part 2). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineeres, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA, USA.
- [41] Cobo, R. (2012). Informe final Proyecto “Construcción de Pozos de Captación y Estaqueos de Acumulación”. Secretaría Comunal de Planificación, Municipalidad de Puente Alto, Puente Alto.
- [42] Rafferty, K.D. (1996). Selected cost considerations dor geothermal district hating in exciting single-family residential areas. Geo-Heat Center, Oregon Insitute of Technology, Klamath Falls, Oregon, EEUU.
- [43] Geo-Heat Center (GHC). Oregon Institute of Technology. Klamath Falls, Oregon, EEUU. <http://www.oit.edu/orec/geo-heat-center>.
- [44] GHC. (2005). Geothermal Direct-Use Case Studies. Oregon Institute of Technology. Oregon, EEUU.
- [45] GHC. (2006). KLDJ-5-55052-04: Task 2 – Farm Bill Geothermal Heat Pump Template – Appendix A. Oregon Institute of Technology. Oregon, EEUU.
- [46] International Energy Agency (OECD/IEA). (2010). Renewable Energy Essentials: Geothermal. The Organisation for Economic Co-operation and Development. www.iea.org.
- [47] Dirección General de Aguas (DGA). Servicio Satelitales en Tiempo Real. Minsiterio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. <http://dgasatel.mop.cl/index.asp>.

- [48] Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Guía de calefacción sustentable del Ministerio del Medio Ambiente. <http://www.calefaccionsustentable.cl/calculadora/>.
- [49] Oyarzún, M. (2010) Contaminación aérea y efectos en la salud. Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias, 26: 16-25.
- [50] Ministerio de la Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2014). Política Nacional de Desarrollo Urbano: Ciudades Sustentables y Calidad de Vida.

Anexos

Anexo A. Cálculo de Coeficientes de Transmisión Térmica (U)

- Ventanas:
 - **U = 5,80 [W/m²K]** Según módulo 02 del curso SCEV (pág. 37), para ventanas de vidrio monolítico, sin espaciador y marco metálico son ruptura de puente térmico.
- Muro 1:
 - U albañilería = 1,70 [W/m²K] Según listado de soluciones constructivas (ED11) para muro de ladrillo hecho a máquina “Santiago Te 9” (código 1.2.M.B9.1).
 - Cálculo Transmitancia columnas y cadena de hormigón:

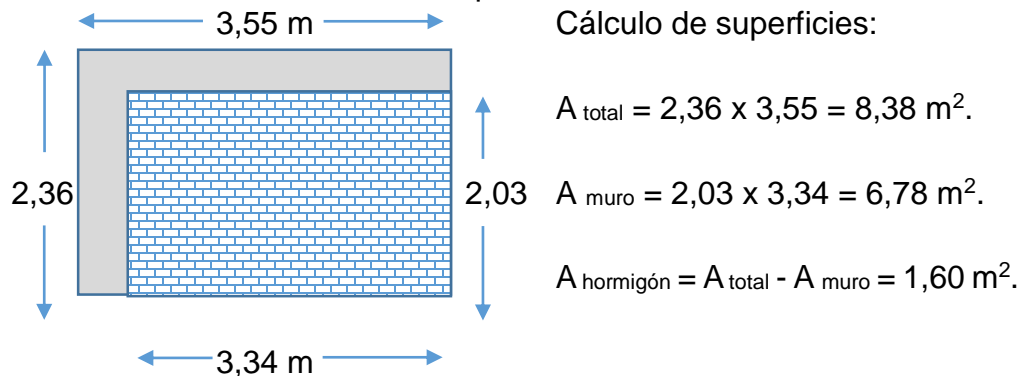
$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}$$

$$R_{hormigón} = R_{se} + \frac{e_{hormigón\ armado}}{\lambda_{hormigón\ armado}^2} + R_{si}$$

$$R_{hormigón} = 0,05 + \frac{0,154}{1,63} + 0,12 = 0,26 \frac{m^2 K}{W}$$

$$\Rightarrow U_{hormigón} = \frac{1}{R_{hormigón}} = \frac{1}{0,26} = 3,78 \frac{W}{m^2 K}$$

- Cálculo superficies: Para el cálculo de la Transmitancia térmica total ponderada se requieren las superficies de los elementos que se determinan a continuación de acuerdo a la especificación.



$$\Rightarrow U_{eq} = \frac{\sum U_i \times A_i}{\sum A_i}$$

$$\Rightarrow U_{eq} = \frac{1,7 \times 6,78 + 3,78 \times 1,60}{8,38} = 2,10 \frac{W}{m^2 K}$$

Sin embargo, para la zona térmica 3, el modelo acepta un valor máximo de U = 1,90 [W/m²K], por lo que se utiliza este valor.

² $\lambda_{hormigón}$ según Anexo 2 NCH 853 para hormigón armado.

- **Muro 2:** Para un cálculo simplificado, se usará el valor de la Resistencia Térmica de una solución constructiva del Listado Oficial que sea similar a la solución especificada, y sumando y restando las capas correspondientes. En este caso se usa como base la resistencia térmica de la solución constructiva código 1.2.M.C26.15, y restando el OSB de 9,5 mm y sumando el OSB de 15 mm y Siding de 6 mm:

$$\begin{aligned}
 R_{tabique} &= R_{si} + R_{yeso10} + R_{tabique\ met.} + R_{OSB15} + R_{siding} + R_{se} \\
 R_{1.2.M.C26.15} &= R_{si} + R_{yeso10} + R_{tabique\ met.} + R_{OSB9,5} + R_{se} \\
 \Rightarrow R_{tabique} &= R_{1.2.M.C26.15} - R_{OSB9,5} + R_{OSB15} + R_{siding} \\
 \Rightarrow R_{tabique} &= R_{1.2.M.C26.15} - \frac{e_{OSB9,5}}{\lambda_{OSB9,5}^3} + \frac{e_{OSB15}}{\lambda_{OSB15}} + \frac{e_{siding6}}{\lambda_{siding6}^4} \\
 \Rightarrow R_{tabique} &= 1,18 - \frac{0,0095}{0,28} + \frac{0,015}{0,28} + \frac{0,006}{0,23} \\
 \Rightarrow R_{tabique} &= 1,23 \frac{m^2K}{W} \\
 \Rightarrow U_{tabique} &= \frac{1}{R_{tabique}} = 0,82 \frac{W}{m^2K}
 \end{aligned}$$

- **Muro 3:**
 - Componente de albañilería confinada:
 $U = 2,09$ [W/m²K] para ladrillo princesa de 29 x 14 x 7,1 cm según catálogo ladrillo princesa (www.princesa.cl). Esto es:

$$\begin{aligned}
 R = \frac{1}{U} = \frac{1}{2,09} &= R_{si} + R_{muro} + R_{se} = 0,12 + \frac{e (= 0,14)}{\lambda} + 0,05 \\
 \Rightarrow \lambda &= 0,45 \frac{W}{mK}
 \end{aligned}$$

Por lo que para un muro de ladrillo princesa de 15 cm de espesor se tiene que:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se}} = \frac{1}{0,12 + \frac{0,15}{0,45} + 0,05} = 2,00 \frac{W}{m^2K}$$

Luego se debe hacer el mismo procedimiento que para el muro 1. Como no se indican en el plano las proporciones de hormigón y albañilería, se considera la misma proporcionalidad que en el muro 1. Por lo tanto:

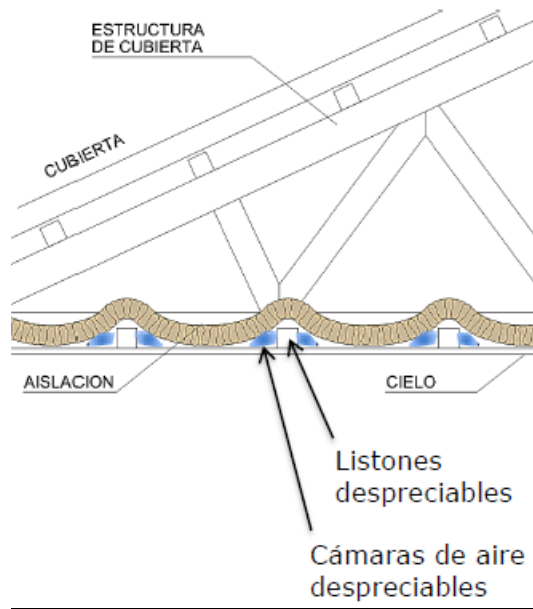
$$U_{albañilería} = 2,00 \times 0,81 + 3,78 \times 0,19 = 2,34 \frac{W}{m^2K}$$

³ Para el OSB se eligió el valor más desfavorable para "Madera, tableros de fibra" según NCH 853.

⁴ Ídem.

Sin embargo, para la zona térmica 3, el modelo acepta un valor máximo de $U = 1,90$ [W/m²K], por lo que se utiliza este valor.

- Techo 1: Estructura de perfiles metálicos con cubierta de planchas de fibrocemento de 4,5 mm, Aislación de R100 mínimo de 188 (1,88 m²K/W) de lana de vidrio, y cielos falsos de yeso-cartón de 10mm.



Se debe calcular la transmitancia térmica ponderada para un elemento de heterogeneidades simples de acuerdo a 5.4.2 de la NCH 853. También se considera que para elementos que separan de un desván, como este caso, los valores para R_{si} y R_{se} son iguales. Por último, se utiliza recomendación de módulo 02 del curso SCEV (pág. 38) que dice que la transmitancia térmica del muro debe ser un promedio ponderado de la estructura con el resto del muro. Se acepta un cálculo simplificado de % de estructura en muros de estructura metálica o de madera, utilizando los porcentajes de estructura que se indican en la tabla siguiente:

Tipo de estructura	% de estructura a considerar
Tabiquería de estructura metálica	10 %
Tabiquería de estructura de madera	15%

- Transmitancia por el perfil metálico: Se utiliza el coeficiente de transferencia de la estructura de metálica se utiliza la fórmula de la NCH n°853, más la resistencia térmica del yeso-cartón:

$$R_{metal} = R_{perfilU} + R_{yeso10}$$

5.4.3.2 Elemento con perfil metálico en U

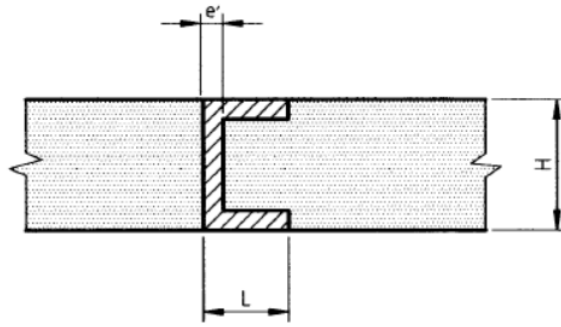


Figura 5 - Elemento reforzado con perfil metálico en U

La resistencia térmica del perfil metálico se calcula como sigue:

$$R = \frac{1}{U} = (R_{si} + R_{se}) \frac{L}{L + e'} + \frac{L}{\lambda_m} \times \frac{H}{e'}$$

en que:

L = ala del perfil, m (ancho de la heterogeneidad);

e' = espesor del nervio del perfil, m;

H = altura del perfil, m (espesor del elemento);

λ_m = conductividad térmica del metal, W/(m x K).

Por lo tanto, se tiene que:

Variable	Valor	Unidad	Fuente
Conductividad	53	W/mK	NCH n°853
R_{si}^5	0,10	m ² K/W	NCH n°853
R_{se}	0,10	m ² K/W	NCH n°853
L	38	mm	
H	60	mm	
e'	0,85	mm	
R_{perfil}	0,25	m²K/W	
R_{yeso10}	0,04	m²K/W	NCH n°853
R_{metal}	0,29	m²K/W	
U_{metal}	3,45	W/m²K	

- Transmitancia por el aislante:

$$R_{aislante} = R_{si} + \frac{e_{yesocarton}}{\lambda_{yesocarton}} + \frac{e_{aislante}}{\lambda_{aislante}} + R_{se}$$

⁵ La resistencia térmica superficial a considerar es, de acuerdo a Tabla 2 NCH 853, 0,10 para el lado interior y el lado exterior.

$$= 0,10 + \frac{0,01}{0,23} + \frac{0,08}{0,042} + 0,10 = 2,15 \frac{m^2K}{W}$$

$$\Rightarrow U_{aillante} = \frac{1}{R_{aisalnte}} = 0,47 \frac{W}{m^2K}$$

- Transmitancia térmica total ponderada:

$$U_{techo1} = 0,9 \times 0,47 + 0,1 \times 3,45 = 0,76 \frac{W}{m^2K}$$

Sin embargo, para la zona térmica 3, el modelo acepta un valor máximo de $U = 0,47$ [W/m²K], por lo que se utiliza este valor.

- Techo 2: Cercha de madera con cielo de yeso-cartón. Sin aislación.

- Transmitancia térmica por volcanita:

$$R_{volcanita} = \frac{1}{U_{yesocartón}} = R_{si} + R_{yesocarton} + R_{se}$$

$$= 0,10 + \frac{0,01}{0,23} + 0,10 = 0,24 \frac{m^2K}{W}$$

$$\Rightarrow U_{yesocartón} = 4,11 \frac{W}{m^2K}$$

- Transmitancia térmica por madera:

$$R_{madera} = \frac{1}{U_{madera}} = R_{si} + R_{yesocarton} + R_{pino} + R_{se}$$

$$= 0,10 + \frac{0,01}{0,23} + \frac{0,08}{0,104} + 0,10 = 1,01 \frac{m^2K}{W}$$

$$\Rightarrow U_{madera} = 0,99 \frac{W}{m^2K}$$

- Transmitancia térmica total ponderada:

$$U_{techo2} = 0,9 \times 4,11 + 0,1 \times 0,99 = 3,80 \frac{W}{m^2K}$$

Sin embargo, para la zona térmica 3, el modelo acepta un valor máximo de $U = 0,47$ [W/m²K], por lo que se utiliza este valor.

- Piso en contacto con terreno: Radier varía entre 10 y 12 cm.

La resistencia térmica total del piso es $R_{piso} = R_{si} + R_i + R_{se}$

$R_{se} = 0$, debido a que no presenta transferencia de calor de un medio sólido a un medio gaseoso.

$R_{si} = 0,17$ m²K/W, de acuerdo a Tabla 2 NCH 853 para flujo descendente.

Λ hormigón liviano = 0,55 W/m²K, según NCH 853.

$$\Rightarrow \frac{1}{U_{piso}} = 0,17 + \frac{0,1}{0,55} + 0 = 0,35 < R_{piso} < 0,17 + \frac{0,12}{0,55} + 0 = 0,39.$$

De acuerdo a tabla 4 NCH853, este radier es considerado “medianamente aislado”, y le corresponde la siguiente transmitancia lineal:

$$\Rightarrow K_l = 1,2 \frac{W}{mK}$$

Anexo B. Detalle Módulos Condominio.

Tipología	45 [m2]	50 [m2]	56 [m2]	61 [m2]	Total [#]	Q inv [kW]	Q ver [kW]
Lote 1	0	55	8	5	68	-901	1079
Lote 2	18	33	7	5	63	-816	977
Lote 3	11	47	9	5	72	-942	1129
Lote 4	10	46	7	5	68	-888	1062
Lote 5	26	22	12	9	69	-907	1095
Lote 6	15	21	16	6	58	-777	944
Lote 7	17	24	21	6	68	-913	1111
Lote 8	15	23	14	5	57	-757	916
Lote 9	12	17	14	8	51	-693	844
Lote 10	23	20	22	6	71	-947	1152
Lote 11	29	13	9	7	58	-751	904
Lote 12	9	40	24	4	77	-1036	1258
Lote 13	7	41	24	4	76	-1026	1246
Lote 14	17	29	18	3	67	-884	1070
Lote 15	0	45	9	6	60	-804	967
Lote 16	0	51	10	0	61	-800	957
Promedio	13	33	14	5	65	-865	1044

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C. Información Técnica y Precios Bombas de Calor



Equipos Agua-Agua



Ventajas Técnicas: COP ≥ 5

- Tecnología inverter.
- Controles auto-adaptativos.
- Telegestión energética opcional.
- Válvulas de expansión electrónicas.
- Sistemas modulares.
- Opción de recuperación gases calientes.



DYNACIAT - Enfriadora/bomba de calor

Potencia frío: 35 a 350 kw.
Potencia calor: 40 a 415 kw.



Sistemas Geotérmicos - Gama GEO (Sólo Calefacción)

Códigos	Descripción			
60.011.12	Bomba de calor	GEO 12 (R410c)	10 kW/mono	220 V
60.011.20	Bomba de calor	GEO 20 (R410c)	20 kW/tri	
60.011.26*	Bomba de calor	GEO 26 (R410c)	26 kW/tri	
60.011.30*	Bomba de calor	GEO 30 (R410c)	30 kW/tri	
60.011.60*	Bomba de calor	GEO 60 MULTI (R407c)	60 kW/tri	

* Sólo de importación.

Sistemas Geotérmicos - Gama GEO DUO (Frío / Calor)

Códigos	Descripción			
80.010.12*	Bomba de calor	GEO 12 (R410c)	12 kW/mono	220 V
80.010.20*	Bomba de calor	GEO 20 (R410c)	20 kW/tri	380 V
80.010.26*	Bomba de calor	GEO 26 (R410c)	26 kW/tri	380 V
80.010.30*	Bomba de calor	GEO 30 (R410c)	30 kW/tri	380 V

* Sólo de importación.



Bombas de Calor Residencial/Comercial: Agua-Agua



Ageo +

- 12 modelos
- Potencia calorífica de 6 a 36 kW
- Potencia frigorífica de 5 a 28 kW
- 230 V Monofásico y 400 V Trifásico 50 Hz



- Dos bombas de circulación aisladas y dos depósitos de expansión integrados
- Límites de funcionamiento -15°C/+45°C



Ageo Caleo

- 4 modelos
- Potencia calorífica de 16 a 25 kW
- 230 V Monofásico y 400 V Trifásico 50 Hz
- Agua caliente a 65°C.



- Límites de funcionamiento -15°C/+45°C
- Dos bombas de circulación aisladas y dos depósitos de expansión integrados.
- Diseño silencioso y atractivo.

Fuente: [37]

Continuación Anexo Anexo C



Códigos	BOMBA CALOR CIAT GEOTERMIA SOLO CALOR	Precio lista USD
00.178.196*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 40H (11,5Kw/220V)	8.715
00.178.197*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 50H (15,3Kw/220V)	9.700
00.178.199*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 50Ht (16Kw/380V)	9.400
00.178.200*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 65Ht (19,8Kw/380V)	9.600
00.178.201*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 80Ht (24,5Kw/380V)	10.350
00.178.202*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 100Ht (30,9Kw/380V)	12.260
00.178.203*	Bomba De Calor Ageo+ Modelo 120Ht (36,4Kw/380V)	13.600

(*) SOLO DE IMPORTACION



Códigos	BOMBA CALOR BAUMANN GEOTERMIA - AEROTERMIA - PISCINA	Precio lista USD
50.010.12	Bomba Calor Aerotermia 12Kw Mono	5.850
50.010.20	Bomba Calor Aerotermia 20Kw Trifasica	9.588
* 50.010.31	Bomba Calor Aerotermia 31Kw Trifasica	12.434
* 50.010.66	Bomba Calor Aerotermia 66Kw Modular Trifasica	26.704
60.011.12	Bomba Calor Geotermia Solo Calor 12Kw Monofasica	5.901
60.011.20	Bomba Calor Geotermia Solo Calor 20Kw Trifasica	9.790
* 60.011.30	Bomba Calor Geotermia Solo Calor 30Kw Trifasica	11.934
* 60.011.60	Bomba Calor Geotermia Solo Calor 60Kw Trifasica	23.550
* 80.010.12	Bomba Calor Geotermia Frio/Calor 12Kw Monofasica	6.532
* 80.010.20	Bomba Calor Geotermia Frio/Calor 20Kw Trifasica	10.771
* 80.010.30	Bomba Calor Geotermia Frio/Calor 30Kw Trifasica	12.856
70.010.09	Bomba De Calor Para Piscina 8,7Kw Mono	2.055
* 70.010.13	Bomba De Calor Para Piscina 13,4Kw Mono	3.444
* 70.010.22	Bomba De Calor Para Piscina 22,3Kw Trifasica	4.403

(*) SOLO DE IMPORTACION

Fuente: [38].

Anexo D. Información Técnica y Precios Fan Coils



Características
2 tubos HEAT / COOL., capacidades desde 150 CFM a 900 CFM.

Fan Coil / Presentación Piso - ANWO by Midea

Características

2 tubos HEAT / COOL., capacidades desde 150 CFM a 900 CFM.

Especificaciones Técnicas

Modelos		Caudal (m³/h)	Potencia (w)		Consumo (w)	Dimensiones (mm)	Peso (kg)
Retorno Frontal	Retorno Inferior		Frio	Calor			
MKF1-150	MKF2-150	255	1.150	2.540	28	800x225x626	22,5
MKF1-250	MKF2-250	425	1.870	4.170	30	800x225x626	22,5
MKF1-300	MKF2-300	510	2.530	5.640	40	1000x225x626	26,5
MKF1-400	MKF2-400	680	3.270	7.220	42	1000x225x626	26,5
MKF1-450	MKF2-450	765	3.970	3.970	33	1200x225x626	31,5
MKF1-500	MKF2-500	850	4.850	10.280	49	1200x225x626	31,5
MKF1-600	MKF2-600	1.020	5.640	12.240	60	1500x225x626	37,5
MKF1-800	MKF2-800	1.380	6.520	15.350	96	1500x225x626	37,5
MKF1-900	MKF2-900	1.530	7.850	18.200	149	1500x225x626	37,5



Fuente: [39].



Códigos	RETORNO FRONTAL	Precio lista USD
MKF1-150	FAN COIL PISO, 250 CFM, 3900 BTU/H FRIO - 5300 BTU/H CALOR	321
MKF1-250	FAN COIL PISO, 250 CFM, 6400 BTU/H FRIO - 8400 BTU/H CALOR	336
MKF1-300	FAN COIL PISO, 300 CFM, 8600 BTU/H FRIO - 11400 BTU/H CALOR	368
MKF1-400	FAN COIL PISO, 400 CFM, 11000 BTU/H FRIO - 14300 BTU/H CALOR	392
MKF1-450	FAN COIL PISO, 250 CFM, 13500 BTU/H FRIO - 17900 BTU/H CALOR	424
MKF1-500	FAN COIL PISO, 500 CFM, 16500 BTU/H FRIO - 21000 BTU/H CALOR	438
MKF1-600	FAN COIL PISO, 600 CFM, 19200 BTU/H FRIO - 24200 BTU/H CALOR	485
MKF1-800	FAN COIL PISO, 250 CFM, 22000 BTU/H FRIO - 30600 BTU/H CALOR	520
MKF1-900	FAN COIL PISO, 250 CFM, 26800 BTU/H FRIO - 35800 BTU/H CALOR	564

Códigos	RETORNO INFERIOR	Precio lista USD
MKF2-150	FAN COIL PISO, 250 CFM, 3900 BTU/H FRIO - 5300 BTU/H CALOR	330
MKF2-250	FAN COIL PISO, 250 CFM, 6400 BTU/H FRIO - 8400 BTU/H CALOR	345
MKF2-300	FAN COIL PISO, 300 CFM, 8600 BTU/H FRIO - 11400 BTU/H CALOR	377
MKF2-400	FAN COIL PISO, 400 CFM, 11000 BTU/H FRIO - 14300 BTU/H CALOR	409
MKF2-450	FAN COIL PISO, 250 CFM, 13500 BTU/H FRIO - 17900 BTU/H CALOR	432
MKF2-500	FAN COIL PISO, 500 CFM, 16500 BTU/H FRIO - 21000 BTU/H CALOR	456
MKF2-600	FAN COIL PISO, 600 CFM, 19200 BTU/H FRIO - 24200 BTU/H CALOR	494
MKF2-800	FAN COIL PISO, 250 CFM, 22000 BTU/H FRIO - 30600 BTU/H CALOR	538
MKF2-900	FAN COIL PISO, 250 CFM, 26800 BTU/H FRIO - 35800 BTU/H CALOR	576

Códigos	RETORNO INFERIOR EMPOTRABLE	Precio lista USD
MKF3-150	FAN COIL PISO, 250 CFM, 3900 BTU/H FRIO - 5300 BTU/H CALOR	263
MKF3-250	FAN COIL PISO, 250 CFM, 6400 BTU/H FRIO - 8400 BTU/H CALOR	278
MKF3-300	FAN COIL PISO, 300 CFM, 8600 BTU/H FRIO - 11400 BTU/H CALOR	307
MKF3-400	FAN COIL PISO, 400 CFM, 11000 BTU/H FRIO - 14300 BTU/H CALOR	327
MKF3-450	FAN COIL PISO, 250 CFM, 13500 BTU/H FRIO - 17900 BTU/H CALOR	351
MKF3-500	FAN COIL PISO, 500 CFM, 16500 BTU/H FRIO - 21000 BTU/H CALOR	380
MKF3-600	FAN COIL PISO, 600 CFM, 19200 BTU/H FRIO - 24200 BTU/H CALOR	406
MKF3-800	FAN COIL PISO, 250 CFM, 22000 BTU/H FRIO - 30600 BTU/H CALOR	432
MKF3-900	FAN COIL PISO, 250 CFM, 26800 BTU/H FRIO - 35800 BTU/H CALOR	456

Fuente: [38].

Anexo E. Tabla de Frecuencia de Temperatura (Bin Method)

	Bin [°C]	Frecuencia [h]					
		Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto	Diciembre
Invierno	4	0	0	2	5	2	0
	5	0	0	14	15	3	0
	6	0	0	25	19	6	0
	7	0	0	42	47	20	0
	8	0	0	43	54	23	0
	9	0	0	52	51	32	0
	10	0	0	52	62	34	0
	11	0	0	41	41	38	0
	12	0	0	37	38	34	0
	13	0	0	30	19	29	0
	14	0	0	13	12	14	0
	15	0	0	5	5	14	0
	16	0	0	4	4	8	1
	17	0	0	0	0	8	0
	18	0	1	0	0	1	2
Verano	19	0	0	0	0	5	6
	20	0	1	0	0	1	4
	21	0	4	0	0	1	5
	22	4	5	0	0	1	7
	23	4	4	0	0	1	8
	24	11	14	0	0	1	10
	25	12	13	0	0	0	22
	26	18	22	0	0	0	25
	27	20	25	0	0	0	25
	28	30	30	0	0	0	27
	29	35	20	0	0	0	25
	30	29	17	0	0	0	12
	31	13	7	0	0	0	6

Fuente: Elaboración propia en base a [45].

Anexo F.Carga Térmica de Viviendas en Función de Temperatura Exterior

Bin [°C]	demanda kW / par vivienda			
	45	50	56	61
4	7	7,7	8,6	9,2
5	6,2	6,8	7,5	8,1
6	5,4	5,9	6,4	6,9
7	4,6	5,0	5,4	5,8
8	3,8	4,1	4,3	4,6
9	2,9	3,2	3,2	3,5
10	2,1	2,3	2,1	2,3
11	1,3	1,4	1,1	1,2
12	0,4	0,4	0,1	0,1
13	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0	0,0
19	1,3	1,4	2,5	2,6
20	2,2	2,4	3,8	3,9
21	3,2	3,5	5,0	5,3
22	4,1	4,5	6,2	6,6
23	5,1	5,6	7,5	8,0
24	6,1	6,6	8,8	9,3
25	7,1	7,7	10,1	10,7
26	8,1	8,8	11,4	12,1
27	9,1	9,9	12,7	13,5
28	10,1	11,1	14,0	14,9
29	11,2	12,2	15,4	16,4
30	12,2	13,4	16,7	17,8
31	13,3	14,4	18,1	19,3

Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Demanda Energética Anual por Par de Casas

Bin [°C]	kWh casa 45 m ² (418 casas)					
	Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto	Diciembre
4	0	0	14	35	14	0
5	0	0	87	93	19	0
6	0	0	135	103	32	0
7	0	0	193	216	92	0
8	0	0	163	205	87	0
9	0	0	151	148	93	0
10	0	0	109	130	71	0
11	0	0	53	53	49	0
12	0	0	15	15	14	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	8
20	0	2	0	0	0	9
21	0	13	0	0	0	16
22	16	21	0	0	0	29
23	20	20	0	0	0	41
24	67	85	0	0	0	61
25	85	92	0	0	0	156
26	146	178	0	0	0	203
27	182	228	0	0	0	228
28	303	303	0	0	0	273
29	392	224	0	0	0	280
30	354	207	0	0	0	146
31	173	93	0	0	0	80
Total mes	1.739	1.467	921	999	472	1.528
Verano	4.734 kWh					
Invierno	2.391 kWh					
Total año	7.124 kWh					

Fuente: Elaboración propia.

Continuación Anexo G.

Bin [°C]	kWh casa 50 m ² (1054 casas)					
	Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto	Diciembre
4	0	0	15	39	15	0
5	0	0	95	102	20	0
6	0	0	148	112	35	0
7	0	0	210	235	100	0
8	0	0	176	221	94	0
9	0	0	166	163	102	0
10	0	0	120	143	78	0
11	0	0	57	57	53	0
12	0	0	15	15	14	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	8,4
20	0	2,4	0	0	0	9,6
21	0	14	0	0	0	17,5
22	18	22,5	0	0	0	31,5
23	22,4	22,4	0	0	0	44,8
24	72,6	92,4	0	0	0	66
25	92,4	100,1	0	0	0	169,4
26	158,4	193,6	0	0	0	220
27	198	247,5	0	0	0	247,5
28	333	333	0	0	0	299,7
29	427	244	0	0	0	305
30	388,6	227,8	0	0	0	160,8
31	187,2	100,8	0	0	0	86,4
Total mes	1.898	1.601	1.003	1.087	513	1.667
Verano						5.165 kWh
Invierno						2.603 kWh
Total año						7.768 kWh

Fuente: Elaboración propia.

Continuación Anexo G.

Bin [°C]	kWh casa 56 m ² (448 casas)					
	Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto	Diciembre
4	0	0	17	43	17	0
5	0	0	105	113	23	0
6	0	0	160	122	38	0
7	0	0	227	254	108	0
8	0	0	185	232	99	0
9	0	0	166	163	102	0
10	0	0	109	130	71	0
11	0	0	45	45	42	0
12	0	0	4	4	3	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	15
20	0	4	0	0	0	15
21	0	20	0	0	0	25
22	25	31	0	0	0	43
23	30	30	0	0	0	60
24	97	123	0	0	0	88
25	121	131	0	0	0	222
26	205	251	0	0	0	285
27	254	318	0	0	0	318
28	420	420	0	0	0	378
29	539	308	0	0	0	385
30	484	284	0	0	0	200
31	235	127	0	0	0	109
Total mes	2.411	2.046	1.018	1.105	504	2.143
Verano						6.600 kWh
Invierno						2.628 kWh
Total año						9.228 kWh

Fuente: Elaboración propia.

Continuación Anexo G.

Bin [°C]	kWh casa 61 m ² (168 casas)					
	Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto	Diciembre
4	0	0	18	46	18	0
5	0	0	113	122	24	0
6	0	0	173	131	41	0
7	0	0	244	273	116	0
8	0	0	198	248	106	0
9	0	0	182	179	112	0
10	0	0	120	143	78	0
11	0	0	49	49	46	0
12	0	0	4	4	3	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	16
20	0	4	0	0	0	16
21	0	21	0	0	0	27
22	26	33	0	0	0	46
23	32	32	0	0	0	64
24	102	130	0	0	0	93
25	128	139	0	0	0	235
26	218	266	0	0	0	303
27	270	338	0	0	0	338
28	447	447	0	0	0	402
29	574	328	0	0	0	410
30	516	303	0	0	0	214
31	251	135	0	0	0	116
Total mes	2.565	2.176	1.100	1.194	545	2.278
Verano	7.019 kWh					
Invierno	2.839 kWh					
Total año	9.858 kWh					

Fuente: Elaboración propia.