

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA SEDE CONCEPCIÓN -
REY BALDUINO BÉLGICA**

**DISEÑO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICA PARA
UNA VIVIENDA EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero de Ejecución
Mecánico de Procesos y
Mantenimiento Industrial

Alumno:

Patricio Núñez Salamanca

Profesor Guía:

Marcelo Quiroz Neira

Profesional Correferente:

Víctor Valdebenito Cartes

DEDICATORIA

Este trabajo, el cual tardó más de lo esperado, ha sido fruto de mucho esfuerzo y dedicación durante varios meses. A pesar de que a veces había contratiempos, falta de ideas, desmotivación, o esa sensación de que el horizonte era demasiado lejano y tedioso, a pesar de ello, este trabajo hoy se encuentra cerca de ese mismo horizonte.

Este trabajo se lo debo en gran medida mi familia, quienes siempre me apoyaron a pesar de las eventualidades ya mencionadas. Ellos me brindaron el apoyo económico y muchas veces ese apoyo emocional que a veces es tan necesario. Especialmente le agradezco a mi mamá Carme Gloria Salamanca quien me dio su apoyo en las buenas y en las malas, además, siempre creyó en mí. Agradezco también a mi hermanita Amada Núñez Salamanca a quien amo mucho y que a pesar de su corta edad endulza la vida de toda la familia. Gracias a todos ellos este trabajo hoy sale a la luz.

RESUMEN

Keywords: GEOTERMIA – DEMANDA ENERGÉTICA – BOMBA DE CALOR – CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICA.

En el mundo existe un problema energético, del cual Chile no es ajeno, debido al cambio climático la búsqueda de energía renovable es cada vez más importante. Lamentablemente Chile presenta un reducido desarrollo energías limpias, como es el caso de la geotermia, si se consideran a países europeos y el potencial geotérmico con el que nuestro país cuenta.

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar un sistema de climatización a base de geotermia de baja entalpía, el cual funcionará mediante una bomba de calor. Esto se aplicará para cubrir las necesidades térmicas de una vivienda unifamiliar para las estaciones de invierno y verano en la región del Biobío.

Para ello se realizará una definición y caracterización de este tipo de energía renovable, la relación de la geotermia como tal y la geotermia de baja entalpía. Se expondrán conceptos como la bomba de calor, inercia térmica, climatización, entre otros. Se mencionará la clasificación de un sistema de climatización geotérmica y sus prestaciones.

Posteriormente se expondrá la ubicación y la construcción de la vivienda, ello implica las características climáticas del lugar junto con la estimación de las cargas térmicas del local.

Tanto las cargas térmicas como el espacio con el que se dispone para la instalación, determinan el diseño del intercambiador de calor enterrado, ello implica la selección de materiales, tipo de intercambiador y el dimensionamiento de este.

Finalmente se realizará un análisis técnico y económico del proyecto en el cual determinará la inversión de la instalación, además de un análisis estratégico mediante herramientas como FODA y las tablas IFAS y EFAS.

ÍNDICE

Dedicatoria

Resumen

Siglas y simbología

Introducción 1

Objetivos 2

Capítulo 1: Planteamiento del problema 3

1.1. Cambio climático 4

1.2. Desarrollo de energías renovables en Chile 4

1.3. Climatización 6

1.4. Matriz de decisiones 7

1.5. Motivación y justificación 8

Capítulo 2: Descripción de un sistema de climatización geotérmica de baja entalpía10

2.1. Antecedentes históricos de la geotermia 11

2.2. Tipos de geotermia 11

2.3. Geotermia de baja entalpía 13

2.4. Inercia térmica 13

2.5. Estructura de un sistema de climatización de baja entalpía. 14

2.6. Bombas de calor 15

2.7. Eficiencia 17

2.8. Bomba de calor geotérmica y aerotérmica 18

2.9. Ventajas y desventajas de una bomba de calor geotérmica. 18

2.10. Clasificaciones 18

2.11. Sistemas de emisión. 21

Capítulo 3: Caracterización de la vivienda y estimación de la demanda térmica 22

3.1. Ubicación de la vivienda y características del lugar. 23

3.2. Descripción de la vivienda. 24

3.3. Cálculo de cargas térmicas 27

Capítulo 4: Diseño del intercambiador de calor enterrado 39

4.1. Metodología 40

4.2. Elección de la bomba de calor 40

4.3. Elección del fluido circulante 42

4.4. Elección del tipo de circuito 43

4.5. Elección de los tubos 45

4.6. Velocidad mínima del fluido 47

4.7. Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado 47

Capítulo 5: Evaluación técnica y económica 52

5.1. Cadena de valor 53

5.2. Análisis FODA 54

5.3. Tablas IFAS y EFAS	58
5.4. Evaluación económica	61
5.5. Consumo eléctrico de la BCG	63
Conclusiones y recomendaciones	65
5.6. Aprendizaje y recomendaciones	65
5.7. Conclusiones	65
Bibliografía	66
Anexos	68
ANEXO A: Glosario técnico.	69
ANEXO B: Productos genéricos sin marca según tabla A1, Nch 853.	70
ANEXO C: Dimensiones y tomas hidráulicas de la BCG	73
ANEXO D: Plano de zonificación térmica de la XIII región	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Usos de la geotermia.	12
Figura 2-2. Variación de la temperatura en la tierra en función de su profundidad.	13
Figura 2-3. Instalación geotérmica.	14
Figura 2-4. Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor.	15
Figura 2-5. Intercambiador de calor enterrado de circuito abierto.	20
Figura 3-1. Ubicación de la vivienda.	25
Figura 3-2. Plano de la vivienda.	26
Figura 3-3. Imagen de la vivienda.	26
Figura 3-4. Componentes de las cargas térmicas	28
Figura 3-5. Diagrama y fórmula de equilibrio térmico.	28
Figura 3-6. Radiación solar al impactar en un cerramiento translúcido.	36
Figura 3-7. Estrategias generales para periodos de frío.	36
Figura 4-1. Bomba de calor geotérmica EcoGeo 1-9 en su versión básica y compacta.	41
Figura 4-2. Esquema de intercambiador Slinky con espiras superpuestas.	44
Figura 4-3. Flujo en paralelo para configuración horizontal.	44
Figura 4-4. Sistema de circuito cerrado horizontal.	45
Figura 4-5. Ramal de circuito horizontal con tipología “Slinky vertical”.	45
Figura 5-1. Esquema de la cadena de valor para geotermia de baja potencia.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Matriz de decisiones	8
Tabla 2-1. Clasificación de entalpía según temperatura y autor.	11
Tabla 3-1. Datos estadísticos de Los Ángeles, Chile.	24
Tabla 3-2. Condiciones de diseño.	29
Tabla 3-3. Resistencia térmica de superficie.	32
Tabla 3-4. Resumen de cálculo de pérdidas por transmisión.	33
Tabla 3-5. Resumen de cálculo de ganancias sensibles.	34
Tabla 3-6. Resumen de cálculo de cargas por ventilación.	35
Tabla 3-7. Resumen de cálculo de cargas sensibles por radiación.	37
Tabla 3-8. Resumen de cálculo de calefacción y refrigeración.	38
Tabla 4-1. Especificaciones de BCG ecoGEO 1-9.	42
Tabla 4-2. Propiedades físicas de los fluidos.	43
Tabla 4-3. Características de tubos de polietileno.	46
Tabla 4-4. Resumen de datos de bomba de calor elegida.	49
Tabla 5-1. Análisis FODA.	55
Tabla 5-2. Tabla EFAS	59
Tabla 5-3. Tabla IFAS.	60
Tabla 5-4. Tabla de costos de inversión.	62
Tabla 5-5. Consumo y costo energético de la BCG.	63

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1. Uso de energía per cápita,1991-2020(Mcal/hab).	5
Gráfico 1-2. Matriz de energía primaria, año 2020.	6
Gráfico 1-3. Proporción de consumo de energía residencial (%).	7
Gráfico 2-1. Evolución de la temperatura del subsuelo.	14
Gráfico 3-1. Temperaturas y precipitaciones promedio.	23

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

ACS: Agua caliente sanitaria.

ASHP: Air Source Heat Pump (Bombas de Calor Aerotérmicas).

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

BC: Bomba de calor.

BCG: Bomba de calor geotérmica.

BNE: Balance nacional de energía.

BTU: British Thermal Unit (Unidad térmica británica).

CEN: Comité europeo de normalización.

CES: Certificación Edificio Sustentable.

COP: Coefficient of performance (Coeficiente de Rendimiento).

DMC: Dirección Meteorológica de Chile.

EER: Energy Efficiency Rating o (Ratio de Eficiencia Energética de una bomba de calor).

EFAS: External Factors Analysis Summary.

ESCO: Empresas de Servicios Energéticos.

FODA: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

GSHP: Ground Source Heat Pump (Bombas de Calor Geotérmicas).

HTR: High Temperature Recovery.

HVAC: Heating, ventilation, and air conditioning (Climatización).

IFAS: Internal Factors Analysis Summary.

IGSHPA: International Ground Source Heat Pump Association.

RITCH: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios en Chile.

RPT: Rotura de puente térmico.

Ø : Diámetro.

\$: Peso chileno.

% : Porcentaje.

Σ : Sumatoria.

B. **SIMBOLOGÍA**

A: Ampere

C: Celsius

cm: Centímetro

G: Gramo

h: Hora

J: Joule

K: Kelvin

km: Kilómetro

l: Litro

m: Metro

s: Segundo

U: Transmitancia térmica

W: Watts

β : Ángulo Beta

λ : Lambda

σ : Sigma

Ω : Ohm

m^2 : Metro cuadrado

m^3 : Metro cúbico

INTRODUCCIÓN

El concepto de la geotermia suele estar asociado a una energía limpia, renovable y eficiente; también es posible asociarlo a tecnologías que se presentan un gran desarrollo en el primer mundo. Por otro lado, el ámbito nacional, es bien sabido que Chile tiene un gran potencial geotérmico debido a su gran cantidad de volcanes, además de presentar uno un desarrollo superior a los países de la región en esta materia.

La palabra geotermia proviene del griego “geos” lo cual significa tierra, y de la palabra “thermos” que es: calor. También puede ser definida como el estudio de las condiciones geofísicas de la tierra, además se utiliza para referirse a los procesos industriales destinados a explotar este recurso.

La energía geotérmica representa un factor importante a la hora de combatir el cambio climático ya que es una energía renovable, sustituye el consumo de combustibles fósiles y sus emisiones de gases invernadero son mucho menores a sistemas en base a combustión por lo que no aumenta el calentamiento global.

La energía geotérmica se presenta en toda la corteza terrestre y esta se asocia principalmente al calor de la tierra. Se sabe que la temperatura de la tierra aumenta en función de su profundidad, la cual tiene un valor de $30^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ (I. G. Gass, Peter J. Smith, R. C. L. Wilson, 1980). A pesar de ello la energía se presenta con mayor intensidad en ciertas estructuras del subsuelo asociadas principalmente a volcanismo, minerales radiactivos y rocas sedimentarias, además es posible encontrar estos excesos de energía en la superficie terrestre, en forma de géiseres, fumarolas y mud pots.

Un sistema geotérmico es comúnmente definido como "Convección de agua en la corteza superior de la Tierra, que, en un espacio confinado, transfiere calor de una fuente de calor a un disipador de calor, por lo general la superficie libre donde el calor es absorbido (dispersado o usado)" (Hochstein, 1990).

El criterio de clasificación de esta energía es la entalpía. Se han establecido varios rangos de temperatura, sujetos además a distintas aplicaciones, los cuales son los siguientes: Geotermia de alta, media y baja entalpía.

Uno de los usos más explotados es la geotermia de baja entalpía, la cual es mucho más simple y económica de implementar además de ser más eficiente que sus pares. Este tipo de energía geotérmica no extrae el calor directamente de la tierra, sino que se aprovecha de la inercia del subsuelo; para realizar esto es necesario implementar una bomba de calor.

La geotermia de baja entalpía puede ser encontrada desde viviendas unifamiliares hasta grandes instalaciones; su uso se aplica a sectores como el residencial, industrial y comercial. Sus prestaciones son principalmente ACS y climatización.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de climatización geotérmica de baja entalpía mediante una bomba de calor para una vivienda en la región del Biobío.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Describir el sistema de climatización geotérmica de baja entalpía.
- Estimar la demanda térmica de la vivienda para periodos de invierno y verano.
- Proponer un diseño de intercambiador de calor enterrado en base a la demanda térmica obtenida.
- Realizar un análisis técnico y económico del diseño para estimar los costos de inversión del proyecto.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe un problema energético mundial, a medida que los países se acercan al desarrollo económico la población aumenta su consumo, entre ellos el consumo energético. En base a lo anterior se puede afirmar que cualquier país que manifieste esta tendencia hacia el primer mundo deberá procurar satisfacer la demanda energética interna. Adicionalmente a esto se debe considerar el problema del cambio climático, cuya problemática está fuertemente ligada al ámbito energético.

El caso particular a estudiar corresponde a una vivienda unifamiliar de 100 m² ubicada la ciudad de Los Ángeles, VIII región (ver Capítulo 3), sin embargo dicha construcción presenta temperaturas demasiado altas en verano y demasiado bajas en invierno, provocando que no se satisfaga el confort térmico reglamentario. Lo anterior se debe a que no posee un sistema de climatización que compense las ganancias y pérdidas de calor generadas por la temperatura ambiente.

Es por ello que la solución a emplear para solucionar dicha problemática consiste en la implementación de un sistema de climatización que funcione en los periodos de invierno y verano, sin embargo, existen varios factores a considerar para poder diseñar un sistema óptimo.

Entre los principales temas relacionados a esta elección se encuentran: el cambio climático, energías renovables y la climatización, además de las prestaciones que el sistema presente.

1.1. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es una variación en el clima del planeta el cual es atribuido de manera directa o indirecta a la acción humana, esta problemática repercute en el aumento de la temperatura media del planeta, alteración del clima a escala mundial y la existencia de distintos tipos de contaminación que provocan daños significativos para la población mundial. Este tema representa gran preocupación en el mundo por lo que se han tomado medidas para lograr detener el fenómeno como la celebración de tratados internacionales medioambientales para reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) entre otras medidas.

En base a lo anterior es posible decir que no basta con aspirar a una buena gestión de la oferta de recursos energéticos, sino que también se debe procurar que el origen de estos sea de tipo renovable.

1.2. DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN CHILE

En el plano nacional también está involucrada la cuestión energética y tiene varias aristas entre las cuales se puede considerar; el aumento de la demanda interna, la necesidad de

energías renovables, la dependencia energética, las emisiones de CO2 al ambiente, entre otros.

Chile ha aumentado considerablemente el uso de energía en el último tiempo. Al año 2020 el consumo de energía final per-cápita se ubicó en 14.830 mega calorías; por otro lado, desde el año 1991 hasta el año 2020 la tasa de crecimiento promedio de uso de energía per cápita asciende al 1,9% interanual tal y como lo muestra la siguiente tabla:

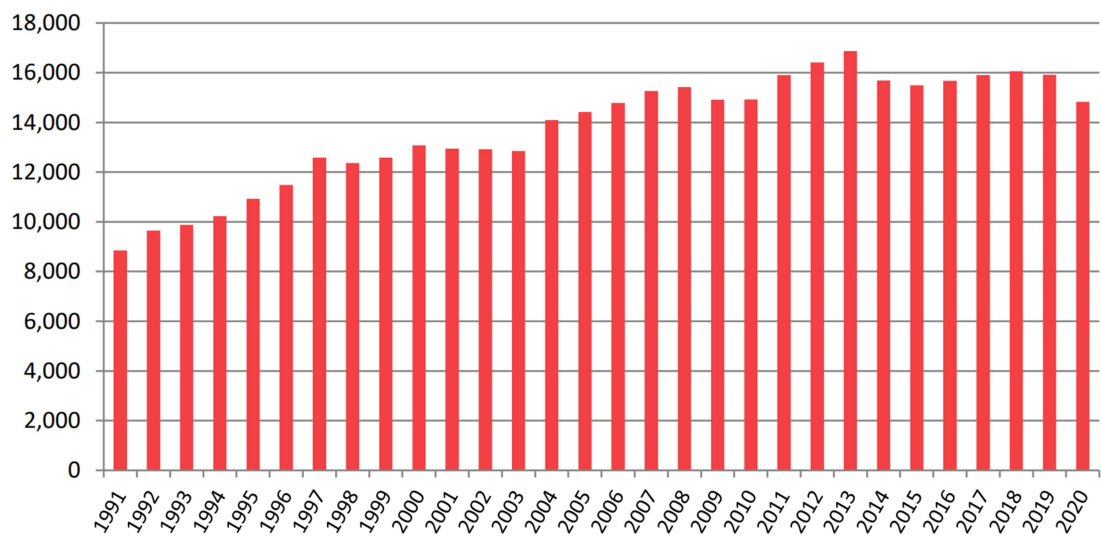


Gráfico 1-1. Uso de energía per cápita, 1991-2020 (Mcal/hab).
Fuente [12].

En cuanto a la producción de energías renovables Chile presenta una posición bastante incierta ya que por una parte es uno de los países con mayor avance en materia de producción de energías renovables en la región, sin embargo, este desarrollo es bastante inferior al de países desarrollados en donde existe una industria consolidada de energías limpias además de un desarrollado campo de investigación de estos temas.

A pesar de que en los últimos años en nuestro país ha aumentado la presencia de energías renovables, estas siguen representando una fracción muy pequeña en comparación a las energías convencionales. Según el BNE (Balance nacional de energía) 2020, Las energías renovables tan solo representan un 4% de la matriz de energía primaria del país, como se muestra en el siguiente gráfico:

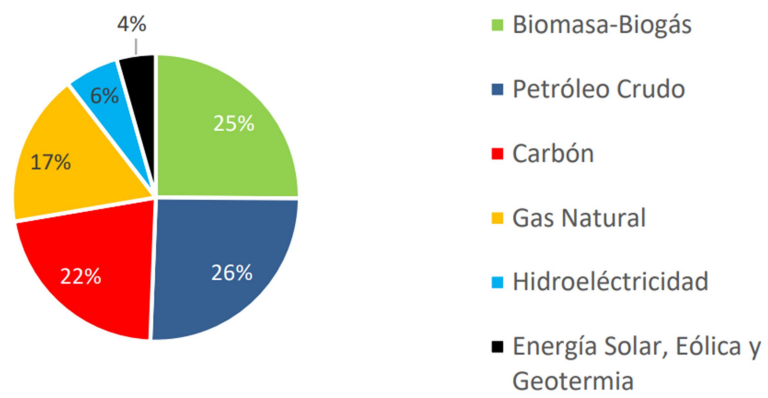


Gráfico 1-2. Matriz de energía primaria, año 2020.

Fuente: [12].

Respecto al plano global Chile presenta una alta dependencia energética del extranjero cuya principal causa es la importación de combustibles fósiles. Según el BNE tan solo en 2020 el 55% de la energía que se consume corresponde a derivados del petróleo, el cual solo se produce en grandes cantidades y en pocos países, mientras que en Chile las reservas existentes son despreciables.

1.3. CLIMATIZACIÓN

Una temperatura óptima en el hogar es crucial a la hora de asegurar el bienestar de los usuarios, es por ello que gran cantidad de la energía que se consume es aportada para labores de climatización de viviendas. Según el BNE 2012 el 20% de la energía total utilizada por el país corresponde al sector residencial. En este mismo sentido es necesario mencionar que en la zona térmica 4 (donde se ubica el Gran Concepción y los Ángeles) un 56% de la energía utilizada en las viviendas se destina exclusivamente para calefacción, tal como lo muestra el siguiente gráfico:

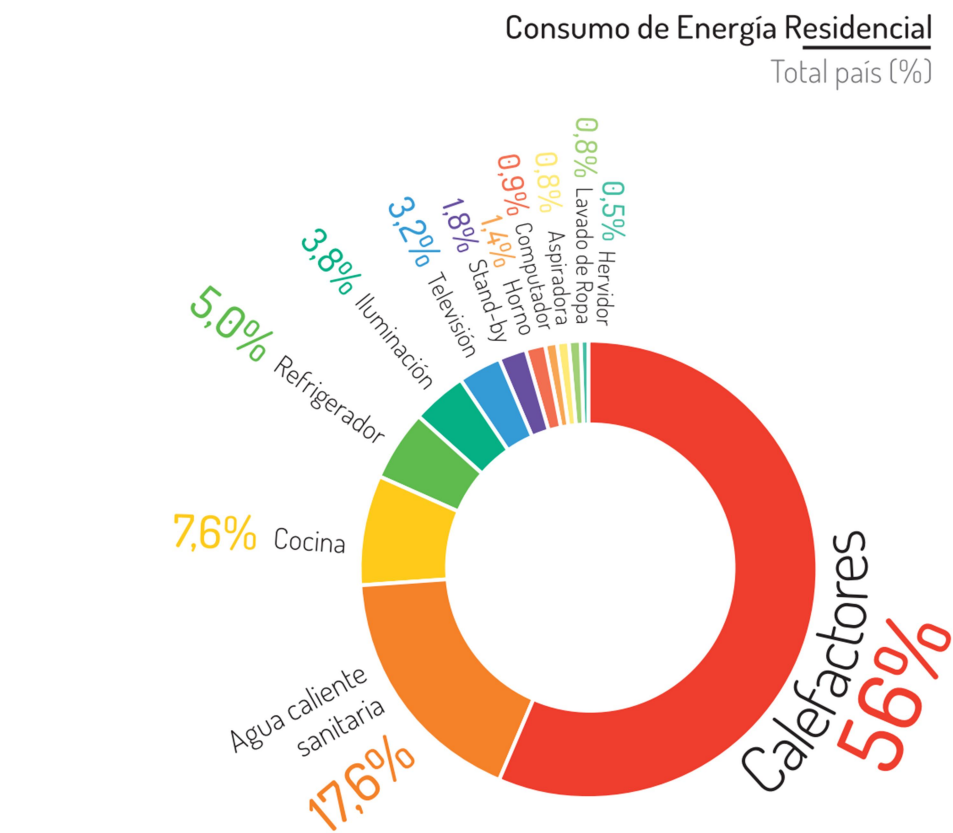


Gráfico 1-3. Proporción de consumo de energía residencial (%).

Fuente: Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico, CORFO 2016.

En cuanto al tipo de climatización existe una alta presencia de calefacción en base a estufas que funcionan en base a leña (biomasa), sin embargo, expulsan grandes cantidades de emisiones de CO2 a la atmósfera, provocando el deterioro de ésta junto con la disminución de la calidad del aire, entre otros problemas. Esta preferencia se explica porque este combustible es más barato y asequible para la población debido al amplio desarrollo forestal que existe desde hace décadas en la región, además, la leña es considerada por la población como un método de calefacción “tradicional”, por ende, está bastante arraigado en la sociedad.

Ahora bien, entre las opciones de calefacción que funcionan con energías limpias existen los calefactores con resistencia, sin embargo, estos solo ofrecen eficiencias que no superan el 100%.

1.4. MATRIZ DE DECISIONES

En vista de los puntos mencionados anteriormente se procede a seleccionar un sistema de climatización. Para ello se realizará una matriz de decisiones, la cual permite evaluar y seleccionar de manera cuantitativa la opción más conveniente en virtud de la importancia que se le dé a cada variable.

Para saber cuál es el método de climatización más adecuado se consideraron 6 sistemas, los cuales serán evaluados mediante la asignación de un valor de 1 a 5 en función de ciertas características; esta últimas tendría una ponderación de 1 a 5. La columna de valor ponderado corresponde a la sumatoria del valor asignado por el factor de cada una de las características. En esta última columna, el valor más alto corresponderá al sistema que mejor se adapte al planteamiento del problema.

El valor de la ponderación corresponde a la importancia que se le da a cada característica.

La elección del sistema se representará mediante una matriz de decisiones, la cual se presenta a continuación:

Tecnología	Valor					Valor ponderado
Características	Bajo costo	Innovación	Refrigeración y calefacción	Eficiencia	Energía limpia	
Ponderación	(x3)	(x4)	(x5)	(x5)	(x4)	
Aerothermia	3	3	5	4	5	86
Geotermia de baja entalpía (BCG).	1	5	5	5	5	93
Estufa a combustión lenta	4	1	1	1	1	30
Caldera a gas	3	3	1	2	3	48
Calefactor eléctrico	5	2	1	1	5	53
Estufa a pellet	4	4	1	2	3	55

Tabla 1-1. Matriz de decisiones.

Fuente: Elaboración propia

El resultado de la matriz indica que la opción más adecuada a implementar para la climatización de una vivienda es mediante geotermia de baja entalpía, obteniendo un resultado de 93 puntos.

1.5. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Se sabe que el mundo experimenta los efectos del cambio climático los cuales aumentan cada vez más con el pasar del tiempo, las temperaturas comienzan a ser extremas y muchas de las consecuencias de dicho cambio ya son irreversibles. A pesar de ello, las emisiones de gases invernadero no disminuyen la cantidad necesaria para reducir el problema. En vista

de lo anterior, un proyecto de geotermia de baja entalpía, a pesar de su magnitud, significa un avance en esta materia a nivel nacional. Entre estas aportaciones se puede rescatar el posicionamiento de este tipo de energías renovables en posibles proyectos e investigación en el ambiente académico y empresarial, aportación de datos, pautas y referencias en cuanto a la realización de proyectos. Además, el hecho de tratar este tema aumenta su “visibilidad” y presencia en la sociedad, lo cual es de suma importancia, ya en Chile la geotermia y sus variantes son un tema muy poco conocido.

El proyecto en cuestión justifica varios puntos, como, por ejemplo: su contribución a la dependencia energética, las ventajas de la geotermia, el potencial geotérmico de Chile, entre otros.

Como ya se ha mencionado una gran cantidad de energía consumida corresponde a combustibles fósiles que son importados, lo cual genera dependencias energéticas de los países productores de petróleo, sin embargo, se sabe que Chile tiene un gran potencial geotérmico gracias a la gran cantidad de volcanes que posee; la explotación de esta energía podría ayudar a reducir el consumo de combustible fósiles, y por consiguiente la dependencia energética.

La geotermia de baja entalpía posee grandes ventajas en comparación a otros métodos, las cuales se mencionan a continuación:

- a. La energía se aprovecha directamente por lo que no se generan pérdidas de transformación de esta, es por ello por lo que este sistema presenta rendimientos con un rango de 4 o 5 COP (Equivalente a 400% o 500%), esto ayuda significativamente al ahorro en la factura de energía por efecto de la climatización. siendo esta última una de las áreas que más gasto generan en el hogar.
- b. Es una energía limpia ya que no emite gases de efecto invernadero a diferencia de otros métodos de calefacción como la biomasa, esto supone una gran ventaja si se considera la crisis del cambio climático.
- c. Un sistema de climatización significa que puede realizar funciones de refrigeración en verano además de calefacción en invierno, esta dualidad ayuda a mitigar las temperaturas cada vez más extremas.

En base a los puntos mencionados anteriormente que se puede considerar a este tipo de sistema como una oportunidad para solucionar problemas de gran relevancia a nivel nacional y local.

CAPÍTULO 2: **DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN**
GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA GEOTERMIA

A comienzos del siglo XX el aumento de la demanda de energía eléctrica propició que se buscaran nuevas fuentes de generación de energía. Los primeros intentos de aprovechamiento geotérmico surgieron en Italia donde Piero Ginori Conti buscaba la generación de energía eléctrica gracias a la explotación de géiseres naturales de vapor seco. El 4 de julio de 1904 Piero Ginori Conti logró encender cuatro bombillas alimentadas por un dínamo que giraba gracias a la energía geotérmica. Más tarde en 1905 consiguió que la producción aumentase a 20 kW. En 1916 el sistema ideado aumentaría aún más su potencia llegando a 2750 kW la cual repartía su energía a toda el área que rodea al pueblo de Larderello además de las ciudades cercanas de Volterra y Pomarance.

En los años 20 esta tecnología comenzó a ser investigada en Japón y Estados Unidos sin embargo dichos países solo se limitaron a la construcción de generadores experimentales, es por ello que Italia siguió siendo el único país en producir la energía geotérmica de manera industrial hasta 1958. En ese año en Nueva Zelanda se construyó la central Wairakei, lo que posicionó a ese país como el segundo mayor productor de energía geotérmica del mundo. Posteriormente en 1960 en Estados Unidos se construiría la segunda central geotérmica del mundo en *The Geysers, California* aportando un total de 11 MW de potencia neta.

Durante la primera crisis del petróleo, alrededor del año 1973, surge una gran expansión de la geotermia. Los países que explotaron esta energía fueron, Japón, Islandia y El Salvador (1975), Indonesia, Kenia, Turquía y Filipinas (1980), Nicaragua (1985), Costa Rica (1995), Guatemala (2000). Entre otros.

2.2. TIPOS DE GEOTERMIA

Como ya se ha mencionado previamente el principal criterio de clasificación de la energía geotérmica es la entalpía y está directamente relacionada con la energía que se extrae del subsuelo. A continuación se diferencian los tipos de geotermia en función de su temperatura según distintos autores.

Fuente: (a) Muffler and Cataldi (1978). (b) Hochstein (1990). (c) Benderitter and Cormy (1990). (d) Nicholson (1993). (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

Clasificación de Entalpía según Temperaturas [°C]					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Recursos de baja entalpia	< 90	<125	<100	<=150	<=190
Recursos de mediana entalpia	90-150	125-225	100-200	-	-
Recursos de alta entalpia	>150	>225	>200	>150	>190

Tabla 2-1. Clasificación de entalpía según temperatura y autor.

Fuente: <https://www.energia.gob.cl>

- a. **Recursos de baja entalpía:** Se utiliza cuando el recurso geotérmico explotado presenta temperaturas inferiores a 90° (Muffler and Cataldi, 1978). Si bien su temperatura es insuficiente para ser transformada en electricidad, esta funciona de manera óptima para calefacción en edificios, y algunos procesos industriales y agrícolas. Ahora bien, si la temperatura es demasiado baja sus principales aplicaciones son la climatización y la obtención de agua caliente (ACS).
- b. **Recursos de media entalpía:** Se utiliza cuando el recurso geotérmico tiene temperaturas superiores a 90° e inferiores a 150°. Su aprovechamiento corresponde principalmente a la producción de electricidad.
- c. **Recursos de alta entalpía:** Corresponde a aquella que aprovecha un recurso geotérmico a temperaturas superiores a 150 °C. Se encuentran en zonas donde existen grandes concentraciones de energía y es posible transformar directamente el vapor del agua en energía eléctrica.

Existen varios autores que han estudiado las aplicaciones de la geotermia, sin embargo, se destaca el trabajo de Baldur Lindal en 1973, en el cual se establecen los usos de la geotermia en función de los rangos de temperatura del recurso geotérmico, tal como se indica en el siguiente diagrama:

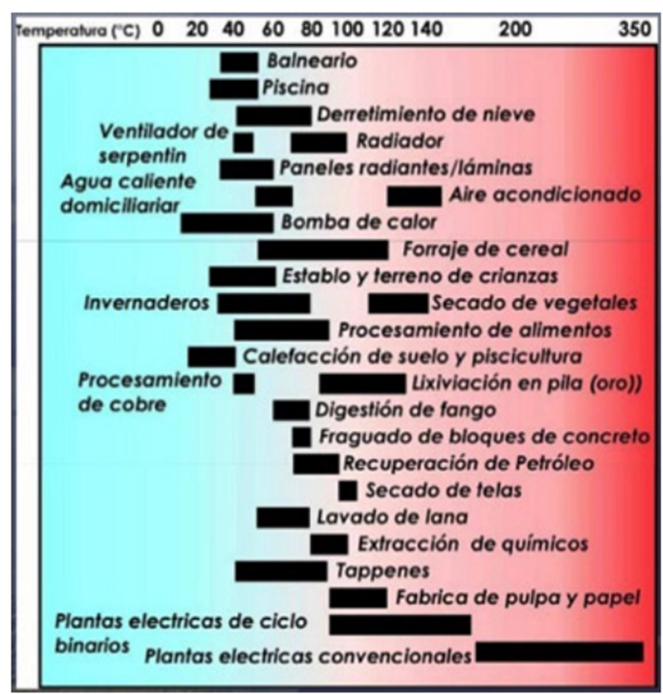


Figura 2-1. Usos de la geotermia.

Fuente: <https://www.energia.gob.cl>

2.3. GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA

La climatización en base a geotermia de baja entalpía corresponde al acondicionamiento de un espacio gracias a la inercia térmica del subsuelo. La mecánica del sistema se basa en la idea de que la temperatura del subsuelo es constante e independiente de la temperatura de la superficie, es por ello que se le extrae energía para labores de climatización mediante el intercambio de calor. En la mayoría de los casos esta energía no es suficiente y es por ello por lo que el sistema se le debe incorporar una bomba de calor para aumentar su eficiencia.

El concepto de climatización se relaciona con las funciones de calefacción, refrigeración y ventilación de la vivienda, por ende, un sistema de este tipo ayuda a aportar calor en invierno y frío en verano.

2.4. INERCIA TÉRMICA

A medida que aumenta la profundidad de la tierra su temperatura presenta más independencia de la temperatura exterior a lo largo del año; por ejemplo, bajo los cuatro metros la temperatura es casi constante, rondando los 16 a 18°C (dependiendo de la zona geográfica). Esto se grafica en las siguientes figuras:

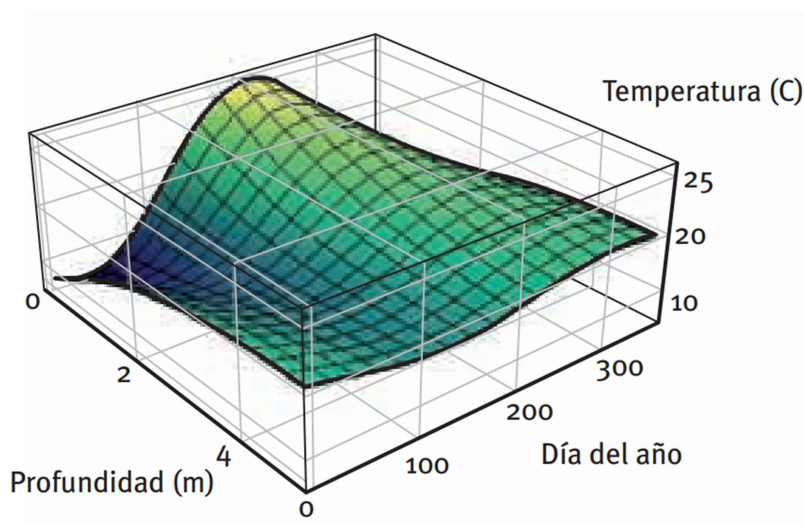


Figura 2-2. Variación de la temperatura en la tierra en función de su profundidad.

Fuente: [2].

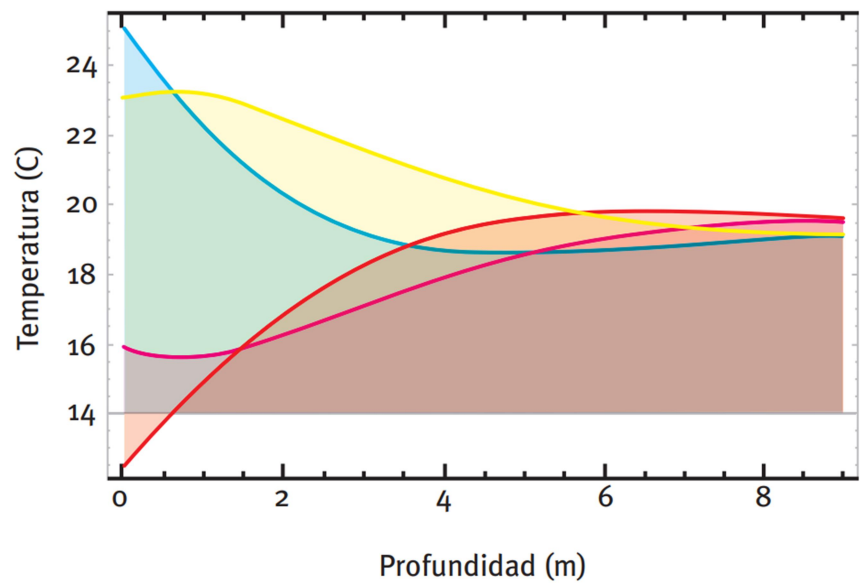


Gráfico 2-1. Evolución de la temperatura del subsuelo.

Fuente [2].

2.5. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN DE BAJA ENTALPÍA.

Un sistema de climatización geotérmica de baja entalpía se compone de tres partes, el intercambiador de calor enterrado, la bomba de calor y el sistema de emisión. El intercambiador de calor se encuentra en el subsuelo (dependiendo de su tipo) y se encarga de extraer o depositar el calor que no se utiliza. La bomba de calor se encuentra en la superficie y se encarga de generar tanto el calor que se necesita como el que no se utiliza, este se conecta a un sistema de emisión el cual se encarga de suplir a la vivienda de sus necesidades (calefacción o refrigeración).

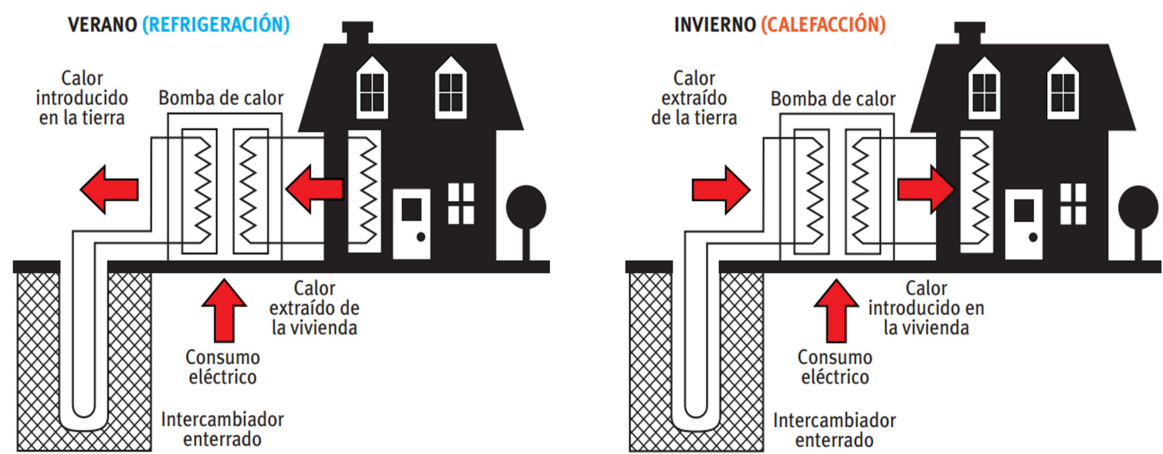


Figura 2-3. Instalación geotérmica.

Fuente: Vulcano, ingeniería y gestión energética.

2.6. BOMBAS DE CALOR

Se sabe que en la naturaleza el calor tiende a ir siempre desde un espacio más cálido hacia un más frío procurando siempre el equilibrio térmico, dicha tendencia se manifiesta de manera natural en el universo, sin embargo, para realizar el proceso contrario este se debe hacer de manera artificial mediante bombas de calor (o refrigeración). Dicha idea se sustenta en la **máquina térmica de Carnot**.

Las bombas de calor son máquinas térmicas que operan en un ciclo termodinámico cerrado donde se transporta calor desde una sección de baja temperatura hasta otra de mayor temperatura. Esto supone un sistema en el cual se genera una diferencia de temperaturas en ambas partes del sistema, cuya utilización o aprovechamiento dependerá de su uso. Estas máquinas térmicas se caracterizan por presentar rendimientos muy elevados cercanos a 4 o 5 COP y sus usos más comunes se traducen en labores de climatización, calentamiento de agua sanitaria y calefacción distrital.

2.6.1. Funcionamiento de una bomba de calor

La forma en la que la bomba de calor transporta la temperatura es mediante la manipulación de los estados de la materia del gas refrigerante mediante procesos de compresión y expansión, estos últimos absorben o liberan calor en virtud de su densidad. Esto ocurre en dos estructuras llamadas condensador y evaporador.

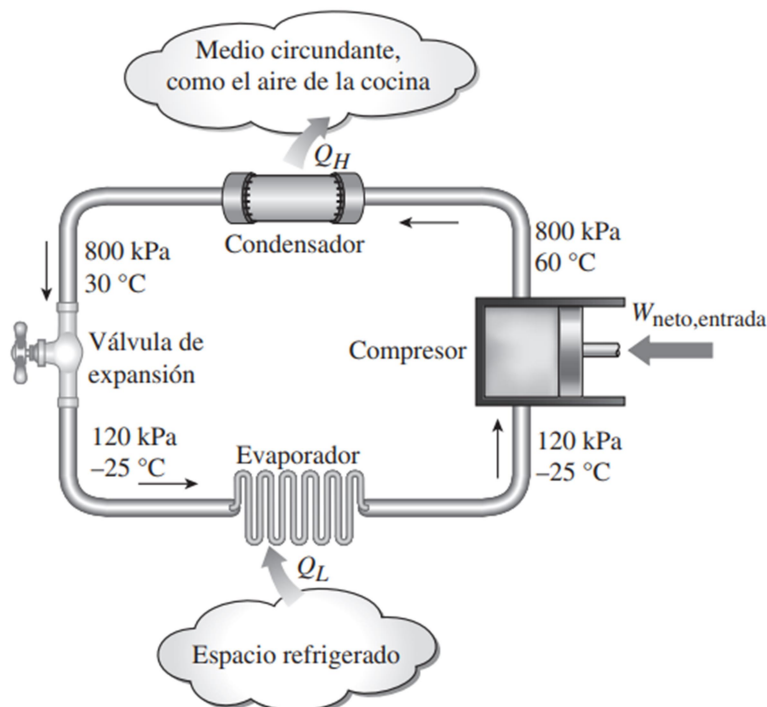


Figura 2-4. Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor.

Fuente: [18].

En el proceso de compresión el refrigerante entra como vapor el cual se comprime elevando su temperatura y presión para luego pasar a un condensador donde a medida que circula libera energía en forma de calor hacia el medio más caliente; posteriormente el fluido pasa por una válvula de expansión donde el fluido disminuye su presión y temperatura para luego dirigirse hacia el evaporador donde el fluido absorbe calor de la región más fría. Finalmente, el fluido vuelve a comprimirse cumpliendo de esta manera el ciclo.

El evaporador y el condensador tienen la forma de un serpentín y su función es absorber o liberar calor al ambiente. El evaporador se encuentra en el foco frío y el condensador en el foco caliente.

Los refrigeradores y las bombas de calor operan en el mismo ciclo, pero difieren en sus objetivos. El propósito de un refrigerador es mantener el espacio refrigerado a una temperatura baja eliminando calor de éste. Descargar este calor hacia un medio que está a temperatura mayor es solamente una parte necesaria de la operación, no el propósito. El objetivo de una bomba de calor, sin embargo, es mantener un espacio calentado a una temperatura alta. Esto se logra absorbiendo calor desde una fuente que se encuentra a temperatura baja, por ejemplo, agua de pozo o aire frío exterior en invierno, y suministrando este calor a un medio de temperatura alta como una casa [18].

Entonces, una bomba de calor mantiene esta condición solo si se aprovecha el calor que produce el condensador, sin embargo, si el objetivo que se persigue es la refrigeración que propicia el evaporador, la máquina adopta la categoría de bomba de refrigeración. Ahora bien, dichos sistemas pueden comportarse tanto como bombas de calor como bombas de refrigeración, esta característica se llama reversibilidad.

Las bombas de calor reversible pueden comportarse además como bombas de refrigeración. Esto se logra mediante la inversión del ciclo de trabajo gracias a la acción de una válvula inversora, de esta manera el condensador cumple la función de evaporador y viceversa. Estos sistemas son comunes en sistemas de aire acondicionado los cuales tienen la capacidad de calefaccionar y refrigerar un mismo espacio en virtud de la estación en la que se encuentra. En verano la unidad interior del recinto que se pretende climatizar es enfriada mediante el evaporador mientras que al llegar el invierno el ciclo se invierte y esa misma unidad para calefaccionar cumple la función de condensador.

Existen bombas de calor de absorción y de compresión, dicha clasificación depende del método de compresión que utilizan. Si este proceso se lleva a cabo mediante un compresor ya sea a gas o a electricidad estamos en frente de un proceso mecánico, por ende, corresponde a una bomba de calor por compresión, por otro lado, si la bomba comprime su fluido mediante la absorción de un fluido refrigerante mediante un segundo fluido de trabajo, entonces corresponde a una compresión gracias a un proceso térmico, por ende, es una bomba por absorción. Las bombas de calor por absorción presentan rendimientos menores que las bombas de calor por compresión, es por ello que en este proyecto se enfocará en la utilización de estas últimas.

Las bombas de calor y frigoríficas se pueden encontrar en sistemas de climatización, aire acondicionado, calefacción, refrigeradores, congeladores, agua caliente sanitaria. Lo anterior aplica tanto a grandes instalaciones industriales como también a sectores residenciales, o comerciales.

2.7. EFICIENCIA

La eficiencia de una bomba de calor (BC) se mide mediante el coeficiente de desempeño COP el cual se define como la relación entre la potencia/energía térmica entregada en el condensador y la potencia/energía eléctrica consumida en el compresor.

Las bombas de calor son conocidas por tener elevadas eficiencias (superiores al 100 %) en comparación a otros sistemas de calefacción o refrigeración, este indicador suele ser de 4 a 5 COP. Lo anterior se debe a que este sistema no produce calor, sino que lo concentra en una parte del sistema (condensador) dejando una parte que absorbe calor en la misma medida que la otra cede calor, por ende, las sumas de temperaturas son cercanas a cero.

Por ejemplo, aparatos tan comunes como refrigeradores que están dotados de una bomba de refrigeración para su funcionamiento también producen calor sin embargo este no es el objetivo de dicha máquina.

La eficiencia de una bomba de calor, en modo calefacción, se mide a través del coeficiente de rendimiento COP (Coefficient of performance), el cual se define como el cociente entre la energía térmica cedida por el sistema (Q_{cal}) y la energía eléctrica consumida por el compresor (W_{comp}) bajo condiciones específicas de temperatura y con el equipo térmico a plena carga [2].

$$COP = \frac{Q_{cal}}{W_{comp}}$$

En modo refrigeración, la eficiencia de la bomba de calor se mide a través del EER (Energy Efficiency Rating), la cual corresponde al cociente entre la energía térmica absorbida por el sistema (Q_{ref}) y el consumo eléctrico generado por el compresor (W_{comp}) en condiciones específicas de temperatura y en operación a plena capacidad.

$$ERR = \frac{Q_{ref}}{W_{comp}}$$

2.8. BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA Y AEROTÉRMICA

Ambos sistemas presentan la eficiencia más alta del mercado, además de muchas similitudes, por ejemplo, funcionan mediante una bomba de calor y son reversibles, sin embargo, presentan una diferencia sustancial, la cual es su sistema de captación.

Mientras que la bomba de calor geotérmica tiene un sistema de captación en el subsuelo, la bomba de calor aerotérmica la tiene en el exterior de la vivienda, esto genera que esta última dependa de la temperatura ambiente, la cual varía demasiado en función de la estación. La consecuencia de esto es que la BCG tiene una mayor eficiencia que la bomba de calor aerotérmica.

2.9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UNA BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.

A. Ventajas de una BCG.

- Rendimiento elevado.
- Es una energía limpia y sustentable.
- Es una energía silenciosa.
- Su mantenimiento es muy simple y no se necesita personal especializado para su ejecución.

B. Desventajas de una BCG.

- Elevados costos de instalación debido principalmente a la magnitud del intercambiador de calor enterrado.
- Desconocimiento generalizado de esta tecnología.
- Implica mayor tiempo en diseñar e instalar el sistema.
- Existe poca oferta de bombas de calor geotérmicas a nivel nacional.
- Existe poca competencia de empresas que realicen este tipo de instalaciones.

2.10. CLASIFICACIONES

Las bombas de calor geotérmicas en términos generales se clasifican en dos categorías en función de la configuración del circuito geotérmico enterrado. Por un lado, se encuentran los sistemas de BCG con circuito cerrado, los cuales utilizan una red de tuberías o colector que extrae (o cede) calor de la superficie o fuente hídrica a través de un fluido caloportador que circula por él (agua o agua + glicol), donde dicho fluido posteriormente transfiere esta energía térmica al ciclo frigorífico de la bomba de calor. Por otro lado, se encuentran los

sistemas de circuito abierto, en el cual se transporta calor directamente de una fuente de agua superficial o subterránea sin utilizar un circuito adicional de transporte térmico [16].

2.10.1. Circuito cerrado

Extraen el calor de la fuente térmica mediante la utilización de un fluido caloportador el cual suele ser agua o agua-Glicol.

- A. Red Vertical:** Son perforaciones con una profundidad de entre 60 a 140 metros. Presenta la ventaja de que su instalación no requiere grandes extensiones de terreno, por otro lado, la gran profundidad de las excavaciones hace que el coste de la instalación aumente considerablemente.
- B. Red Horizontal:** El intercambiador de calor está a una profundidad constante del subsuelo y están esparcidas por una gran cantidad de terreno. Es un sistema menos eficiente que la red vertical, sin embargo, es más barato debido a la poca profundidad de las tuberías.
- C. Intercambiador Sumergido:** Se utiliza cuando en las cercanías existe un río o lago en los cuales se sumerge el colector, para que realice el intercambio de calor. Su implementación es bastante económica debido a que su instalación no implica perforar el terreno.
- D. Intercambiadores Slinky:** Este tipo de intercambiadores presenta una forma espiral, desde ahí surge su nombre (Slinky o Rizado). Tiene la ventaja de que se pueden instalar largos tramos de tuberías en terrenos reducidos. La aplicación de esta modalidad se suele combinar con redes horizontales o sumergidas.
- E. Sistemas Híbridos:** Agrupa o combina distintas configuraciones o técnicas las cuales se han definido anteriormente. Además, es posible combinar distintas formas de captación correspondientes a otros sistemas por ejemplo la Hibridación Fotovoltaica. donde la energía que se le suministra a la bomba de calor proviene de paneles solares, o también puede tener un sistema de captación híbrida la cual se alimenta de Geotermia y Aerotermia

2.10.2. Circuito Abierto

Este tipo de circuito se suele aplicar mediante tubos verticales a gran profundidad de la superficie que extraen agua del subsuelo para realizar el intercambio térmico, luego el fluido se devuelve al subsuelo mediante una segunda perforación. Se utilizan para abastecer grandes instalaciones inmobiliarias y comerciales, a un costo relativamente bajo en comparación a la energía que aportan.

Las bombas de calor de ciclo abierto se caracterizan por utilizar agua superficial o aguas freáticas como fuentes de transporte de calor para suministrar calefacción, refrigeración y/o producción de agua caliente sanitaria. Estos sistemas en general son implementados en instalaciones de gran escala como hoteles, hospitales, edificios, e inclusive en sistemas de calefacción distrital. Se tiene un registro de diferentes casos donde las fuentes hídricas utilizadas han sido el agua de mar, agua de río, agua de lago e incluso agua residual [16].

Esta tipología de bomba de calor se clasifica en dos: los sistemas agua-aire y los sistemas agua-agua. Estos últimos emplean dos circuitos hidráulicos los cuales interactúan entre sí a través del ciclo de refrigeración, donde, uno de ellos corresponde a la fuente con la que se intercambia el calor y el otro corresponde a la instalación de los espacios afines a climatizar. Con este tipo de configuración, es posible además producir agua caliente sanitaria. Por otro lado, los equipos agua-aire utilizan una batería interior y un intercambiador refrigerante-agua exterior, de forma que absorben calor desde la fuente hidráulica en modo de producción de calor, o la disipan a estos mismos sistemas en modo de producción de frío. El propósito final de este tipo de sistemas es climatizar. [16]

Es importante mencionar que estos sistemas en la práctica no consumen el agua del subsuelo ya que luego de absorber y realizar el intercambio térmico, esta es devuelta al lugar de donde se extrajo.

La materialización de este tipo de sistemas implica mayor complejidad. Los fluidos extraídos directamente de una fuente hídrica pueden tener residuos, contaminantes biológicos, elevados niveles de PH, entre otras condiciones que podrían afectar negativamente al colector, esto puede provocar la disminución de su vida útil o incluso la reducción progresiva de la eficiencia de la BCG. Debido a lo anterior es importante tomar las medidas necesarias e inversión en ingeniería para prever este tipo de inconvenientes.

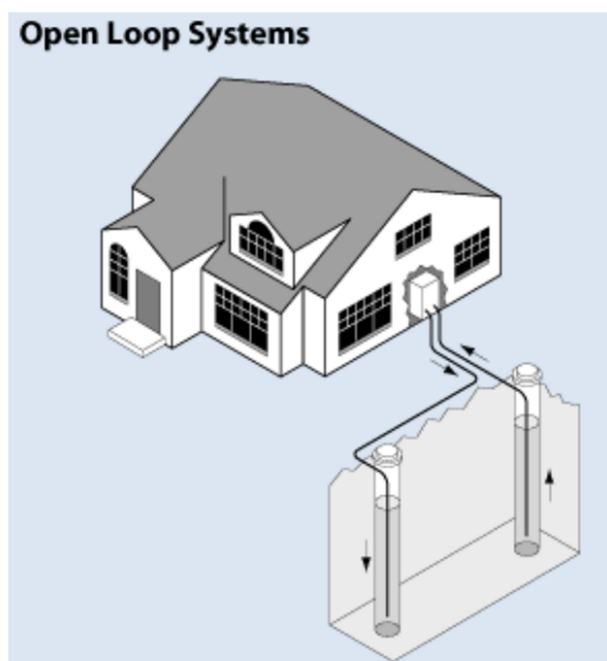


Figura 2-5. Intercambiador de calor enterrado de circuito abierto.

Fuente: <https://igws.indiana.edu/Geothermal/HeatPumps>.

2.11. SISTEMAS DE EMISIÓN.

Para cumplir con las necesidades de climatización de la vivienda se necesitan sistemas de emisión que transmitan esa energía producida por la bomba de calor al local.

Los sistemas de emisión liberan o absorben la energía hacia la vivienda, estos sistemas son alimentados por una red de cañerías que transportan un fluido. Para calefaccionar la vivienda el fluido debe ser caliente mientras que para refrigerar el fluido debe estar frío.

Los sistemas de emisión más comunes son los siguientes:

- Suelo Radiante.
- Radiadores.
- Fancoils o ventiloconvectores.

CAPÍTULO 3: **CARACTERIZACIÓN DE LA VIVIENDA Y ESTIMACIÓN**
DE LA DEMANDA TÉRMICA

3.1. UBICACIÓN DE LA VIVIENDA Y CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR.

La ciudad de Los Ángeles es una comuna correspondiente a la capital de la provincia del Biobío. Se encuentra a una distancia de 510 km de Santiago. Las comunas circundantes son Quilleco, Santa Bárbara, Mulchén, Negrete, Nacimiento, Laja, Yumbel y Cabrero.

Se encuentra emplazada entre los paralelos 37° 10' y 37° 40' y los meridianos 72° 42' y 72° 00' longitud oeste, en el extremo sur de la región central del país, ocupando la depresión central desde el río Laja por el norte al río Biobío por el sur, en un plano inclinado que desciende hacia el poniente, a una altura media de 133 m.s.n.m.

Los Ángeles presenta un clima mediterráneo continentalizado. En la siguiente figura se presentan las temperaturas y precipitaciones promedio observadas en la ciudad. Ambas variables siguen tendencias estacionales, con periodos invernales con bajas temperaturas y altas precipitaciones, mientras que en verano las temperaturas aumentan de forma importante alcanzando su punto máximo en enero, coincidiendo con las menores precipitaciones. Entre mayo y agosto se registran el 72% de las precipitaciones totales del año, en este periodo se observan también las menores oscilaciones térmicas de entre 7 y 9 °C, mientras que en el periodo estival la oscilación está sobre los 15°C. (Diagnóstico para la aplicación de las mejoras metodológicas al PRC en la ciudad de Los Ángeles. Dese, 1- ,1C. 2018)

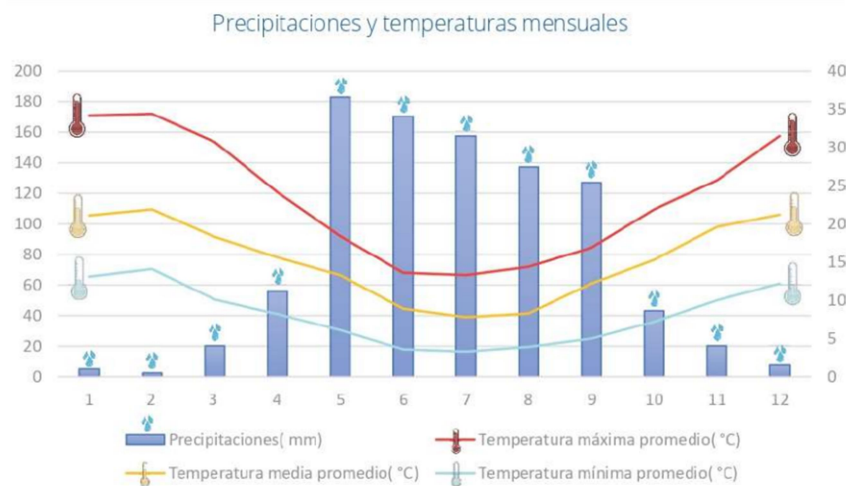


Gráfico 3-1. Temperaturas y precipitaciones promedio.

Fuente: Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad del Bío-Bío 2019 (UBB, 2019)

Las características más relevantes de la ubicación de la vivienda se representan en la siguiente tabla.

Datos	Valor	Unidad
Latitud	-37.4697	-
Longitud	-72.35366	-
Elevación sobre el nivel del mar	145	<i>m</i>
Temperatura máxima promedio en verano	29	°C
Temperatura mínima promedio en invierno	3	°C
Temperatura media anual	13,3	°C
Humedad relativa en verano	59	%
Humedad relativa en invierno	85	%

Tabla 3-1. Datos estadísticos de Los Ángeles, Chile.

Fuente: Adaptado de www.weather-atlas.com

3.2. **DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA.**

La instalación del sistema de climatización geotérmica se realizará en una casa ubicada en un sitio en el sector denominado “Loteo Fundo el Carmen” lugar cercano a la zona urbana de ciudad de Los Ángeles, región del Biobío.

El sector se ubica en el sector norte de la ciudad como se muestra en la siguiente figura:

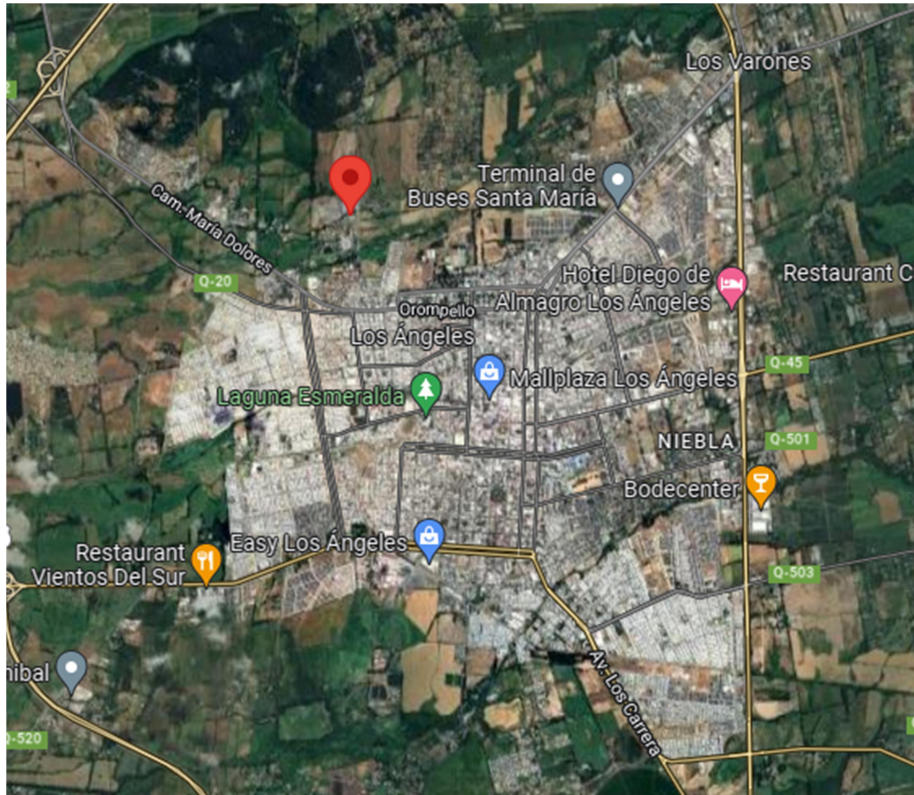


Figura 3-1. Ubicación de la vivienda.

Fuente: Google earth.

La vivienda tiene un total de 100 metros cuadrados y está emplazada en un sitio de 375 metros cuadrados. Cuenta con tres habitaciones, dos baños, living comedor, cocina y lavandería. Las puertas que conectan con el exterior son tres, una en la entrada principal la cual conecta con el living, otra en la cocina la cual conduce al patio trasero y una última salida que se encuentra en la lavandería, que si bien es una ventana a piso, también se utilizará para la circulación de personas hacia el exterior del local.

La vivienda está construida sobre una base de hormigón y presenta un piso de cerámica. En cuanto a los muros de la vivienda están compuestos por una tabiquería de madera de pino radiata de 3x2 pulgadas.

Las paredes interiores de la casa están conformadas por aislante de fibra de poliéster, fibra de cemento cubiertas con pasta muro y pintura sobre esta última. Las paredes exteriores tienen una capa de fieltro, seguido de planchas de OSB, para terminar con una capa de siding (fibra de cemento).

La información previamente mencionada se apoya en las siguientes figuras:

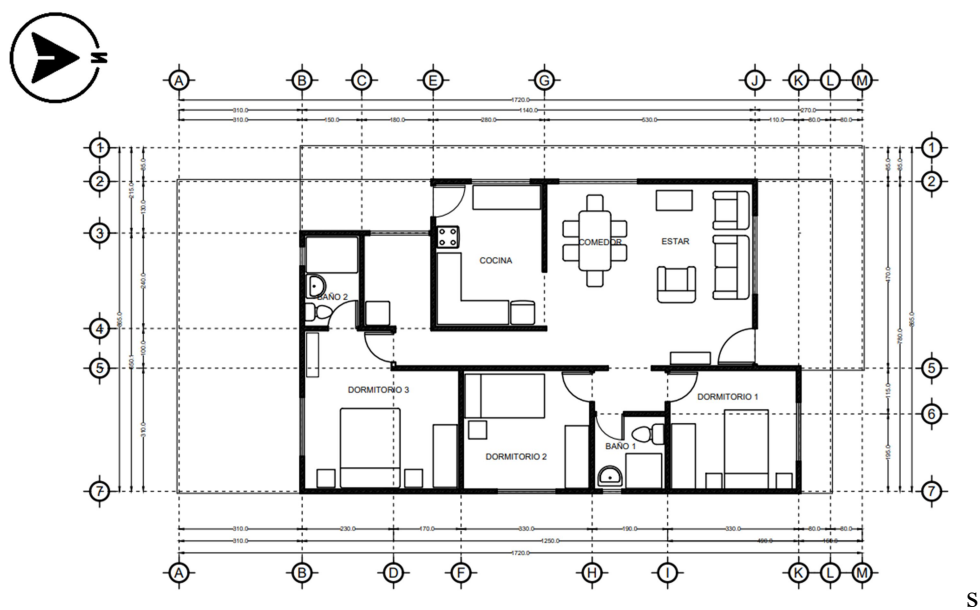


Figura 3-2. Plano de la vivienda.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-3. Imagen de la vivienda.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS

Para la instalación de un sistema de climatización es importante conocer el consumo de este, vale decir la capacidad que esta tendrá de acondicionar un espacio determinado. Esta última demandará una cantidad de calor específica en función de algunos factores como: las características de la envolvente, estación del año, radiación solar, entre otros.

En el mercado existe una gran variedad de bombas de calor geotérmica con distintas potencias y prestaciones, es por ello que un buen cálculo de cargas térmicas permite una elección más eficiente y adecuada del equipo. Si se adquiere una bomba de calor sobredimensionada esto significarán un gasto extra de dinero y potencia, por otro lado, la elección de un sistema con una potencia inferior a la requerida significa la no satisfacción de las necesidades del usuario.

Luego de introducir conceptos como el balance térmico y la temperatura de confort se procede a obtener las cargas térmicas las cuales son las siguientes:

- Cálculo de resistencias y transmitancias de la envolvente.
- Cargas internas sensibles.
- Ganancias internas latentes.
- Cargas por ventilación.
- Cargas por radiación.

Las cargas térmicas latentes son aquellas que generan un cambio de humedad en el ambiente mientras que las cargas térmicas sensibles generan variaciones en la temperatura del entorno.

3.3.1. Balance térmico

Las condiciones térmicas de una vivienda dependen de las pérdidas y ganancias de calor. Las cargas térmicas interactúan generando un intercambio al interior de la vivienda, por ejemplo, la radiación solar, el calor aportado por las personas, la temperatura exterior, las aportaciones producidas por las luces de la vivienda, la resistencia aportada por las paredes y ventanas, entre otros. La sumatoria de estos elementos tiende a alterar la temperatura dentro de la vivienda. Si las ganancias son mayores a las pérdidas, el local tenderá a calentarse, por otra parte, si las ganancias son inferiores a las pérdidas, el recinto tenderá a enfriarse. Es por ello que la vivienda debe valerse de un sistema de climatización que aporte o quite energía con el fin de llegar a la temperatura de confort.

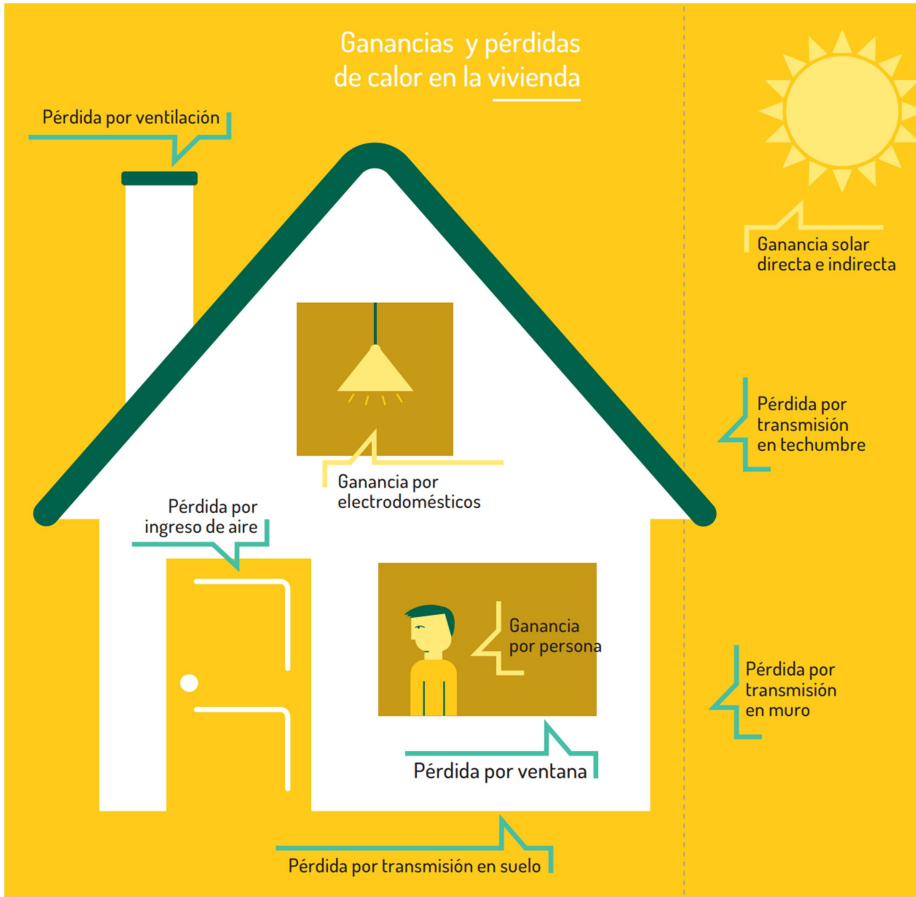


Figura 3-4. Componentes de las cargas térmicas

Fuente: Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico, CORFO 2016.

El balance o equilibrio térmico de una vivienda ocurre cuando la suma de las ganancias y pérdidas de calor es igual a cero. Tal y como lo muestra el siguiente diagrama:

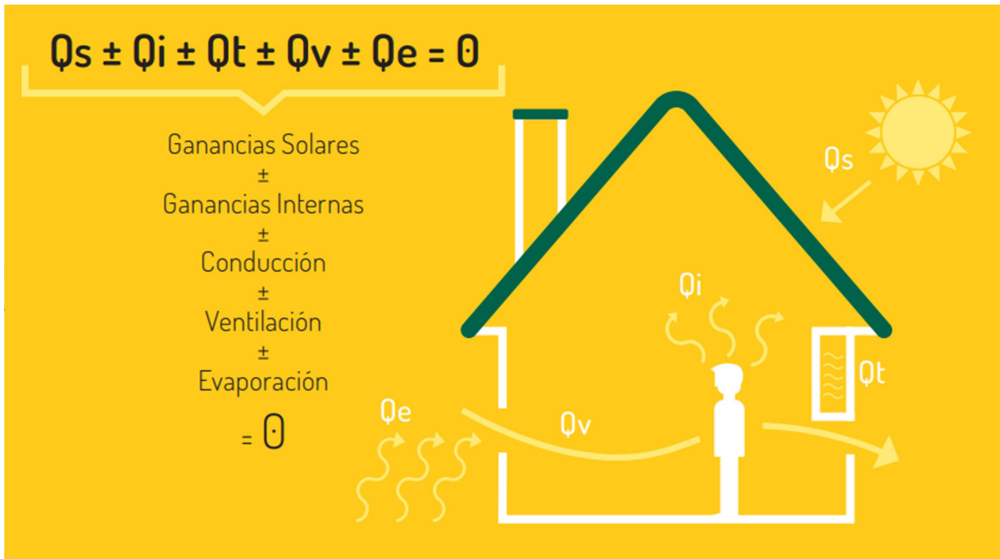


Figura 3-5. Diagrama y fórmula de equilibrio térmico.

Fuente: Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico, CORFO 2016.

3.3.2. Temperatura de confort o confort térmico.

Las condiciones climáticas a la intemperie son inapropiadas para la salud y la vida de las personas, por otra parte, el interior de una vivienda presenta condiciones óptimas para el bienestar de un individuo, a esto último se le denomina temperatura de confort.

El concepto de confort térmico ha evolucionado a lo largo del tiempo y ha adquirido distintos significados. La ASHRAE lo define de la siguiente manera “es la condición mental que expresa satisfacción con el entorno”. Por otro lado, la norma ISO 7730 define el confort térmico como “una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”

Estudios basados tanto en técnicas experimentales como valoraciones subjetivas investigaron los márgenes de temperatura óptimos con los cuales la gran mayoría de las personas se encuentran cómodas.

Según el RITE, se deben tomar valores máximos y mínimos de temperatura al interior de la vivienda. En verano debe tener una temperatura de confort oscila entre los 23 y 25°C, en función de los niveles de actividad del interior.

Cuando en el interior del local hay personas sentadas se recomiendan 25°C, si las personas están paseando se debe considerar una temperatura de 24°C, Si se está realizando ejercicio físico se debe tomar 23°C. Por otro lado, no se recomienda salir del rango de estos valores ya que las temperaturas inferiores a 23°C pueden provocar resfriados, mientras que las superiores a 25°C generan sudoración.

Estación	Temperatura Operativa °C	Velocidad Media del Aire m/s	Humedad Relativa %
Verano	23 a 25	0,18 a 0,24	40 a 60
Invierno	20 a 22	0,15 a 0,20	40 a 60

Tabla 3-2. Condiciones de diseño.

Fuente: RITECH, 2007.

A partir de las temperaturas de confort se establecerán las temperaturas de diseño, dicho de otro modo, la temperatura a la que debe llegar el sistema de climatización para satisfacer las necesidades del usuario tanto para refrigeración como para calefacción. Para este proyecto se considerarán 24° como temperatura de diseño de refrigeración (verano) y 20°C como temperatura de diseño de calefacción (invierno).

3.3.3. Cargas conductivas y convectivas a través de la envolvente térmica (Cargas por transmisión).

Corresponde a las cargas que traspasan la envolvente de la vivienda, la cual abarca ventanas, muros perimetrales, piso y techo. Lo anterior se obtiene en base a las características constructivas de los materiales. La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$Q_c = \sum_i (U * A)_i * \Delta T [W]$$

Donde U es la transmitancia térmica, A es el área de la superficie, i son ventanas, piso, techo y muros perimetrales, finalmente ΔT es la diferencia de temperatura. Esta ecuación también se puede representar de la siguiente manera:

$$Q_c = (U_m * A_m + U_v * A_v + U_t * A_t * K_p + P_p) * \Delta T [W]$$

Donde:

- U_m corresponde a la transmitancia térmica de muros perimetrales
- A_m es el área de los muros perimetrales
- U_v es la transmitancia de las ventanas
- A_v corresponde al área de las ventanas
- U_t es la transmitancia de techo
- A_t es el área del techo
- K_p corresponde a la conductividad del cerramiento perimetral del piso
- P_p es el perímetro del cerramiento perimetral del piso

La diferencia de temperaturas se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta T = (T_o - T)$$

Donde:

- ΔT es variación de temperatura
- T_o es la temperatura media de invierno y verano
- T es la temperatura de diseño para invierno y verano

Nota: la variación de temperatura (ΔT) cambia cuanto esta es para refrigeración y para calefacción, se designarán como ΔT_{ref} y ΔT_{cal} respectivamente.

Para conocer la transmitancia de los materiales es necesario recurrir a la norma chilena NCh 853 - Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas.

3.3.4. Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas

A continuación se definirán los conceptos de transmitancia y además de los tipos de resistencia según la condición y tipo de la envolvente.

- a. Transmitancia o transmisividad térmica:** Flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Se define como la inversa de la resistencia térmica.

Para elementos compuestos la fórmula es la siguiente:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

- b. Resistencia térmica de una capa material, R :** Para una capa de caras planas y paralelas de espesor e , conformada de un material con conductividad térmica homogénea.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Donde e es el espesor de la envolvente de la capa material. λ es el calor específico y se encuentra en la tabla de productos genéricos de la norma NCh 853 (Ver Anexo B).

- c. Resistencia térmica de un elemento compuesto:** Inverso de la transmitancia térmica del elemento. Suma de las resistencias de cada capa del elemento.

$$R_T = \frac{1}{U}$$

Donde R_T es la resistencia térmica y U es transmitancia. Ahora bien, el valor de R_T también se puede expresar de la siguiente manera.

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

Donde R_{si} es resistencia térmica de superficie al interior de un edificio, R_{se} es resistencia térmica de superficie al exterior de un edificio, ambos datos se encuentran en la Tabla 3-3. Dichos valores cambian en función tanto del flujo de calor como de la situación del elemento. Por ejemplo, si se desea obtener la transmitancia de la envolvente, se debe considerar un flujo horizontal en elementos verticales, sin embargo, si se desea obtener la resistencia a través del techo se debe considerar un R_{si} y R_{se} de flujo ascendente o descendente (dependiendo de la estación) en elementos horizontales.

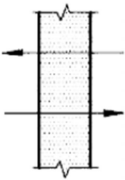
Resistencias térmicas de superficie en m² x K/W							
Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$	R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que 60º respecto a la horizontal		0,12	0,05	0,17	0,12	0,12	0,24
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60º respecto a la horizontal		0,09	0,05	0,14	0,10	0,10	0,20
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60º respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Tabla 3-3. Resistencia térmica de superficie.

Fuente: NCh 853.

Los resultados de la aplicación de las fórmulas previamente mencionadas se representan en la siguiente tabla:

Componente	Valor	Unidad
ΔT_{ref}	5	K
ΔT_{cal}	-17	K
U_m	1,016	$\frac{W}{m^2 * K}$
A_m	73,55	m^2
U_v	5,3	$\frac{W}{m^2 * K}$
A_v	18,45	m^2
U_t	1,031	$\frac{W}{m^2 * K}$
A_t	100	m^2
K_p	1,4	$\frac{W}{m * K}$
P_p	40	m
Q_{cRef}	1.328,6	W
Q_{cCal}	-5.425,810	W

Tabla 3-4. Resumen de cálculo de pérdidas por transmisión.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Ganancias internas sensibles

Consiste en las aportaciones generadas al interior de la vivienda, y de manera independiente a la temperatura exterior. Las ganancias pueden provenir del calor generado por las personas al interior del recinto, calor desprendido de equipos electrodomésticos, ganancias por iluminación y otros aparatos de calefacción existentes en el local.

$$Q_{sens} = K_{pers} + K_{eq} + K_l$$

Donde Q_{sens} es el calor sensible, K_{pers} es el calor generado por las personas, K_{eq} es el calor generado por los electrodomesticos y K_l es el calor generado por la iluminación, sin

embargo, en este estudio no se considerará esta última ya que el local cuenta con luces LED, por lo tanto, el calor que estas desprenden se considera despreciable.

$$K_{pers} = K_{sens} * N^{\circ}_{pers}$$

Donde, K_{sens} es el calor sensible aportado por cada persona, y se considera como 70W, para un adulto y 35W para un niño, N°_{pers} es el número de personas. Para la obtención de K_{pers} se considerará que la vivienda está diseñada para cuatro integrantes, dos adultos y dos niños.

Para la obtención de ganancias aportadas por electrodomésticos K_{eq} se considerarán aportaciones totales de 200W.

Componente	Valor	Unidad
K_{pers}	210	W
K_{eq}	200	W
Ganancias internas Q_{sens}	410	W

Tabla 3-5. Resumen de cálculo de ganancias sensibles.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. Ganancias internas latentes

Para el cálculo de este dato se consideran las cargas latentes que emana una persona y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$K_{pers.lat} = K_{lat} * N^{\circ}_{pers}$$

Donde K_{lat} es el calor latente propio de una persona, dicho dato se multiplica por el número de integrantes. Al igual que el ejercicio anterior se considerarán dos adultos y dos niños, el calor latente de cada uno de ellos corresponde a 60W y 30W respectivamente.

Al realizar el cálculo se obtiene una ganancia interna latente de 180W, las cuales se aplican a invierno y verano.

3.3.7. Cargas por ventilación sensible

La ventilación produce pérdidas en un local, pues favorece el traspaso de energía de este con el exterior, a pesar de ello, este flujo ayuda a tener buenas condiciones de higiene y a oxigenar el aire mediante su circulación. La ventilación puede realizarse mediante ventanas, puertas o sistemas de ventilación. Por otro lado, el flujo de aire también puede producirse a través de los cerramientos de las puertas sin cierre hermético.

Las cargas de ventilación se obtienen a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_v = \rho * C_p * V_{vent}(T_0 - T)$$

Donde ρ es densidad del aire $\left(1,2 \frac{kg}{m^3}\right)$, C_p es el calor específico $\left(0,279 \frac{Wh}{kg\ ^\circ C}\right)$, V_{vent} es el flujo volumétrico del aire, el cual guarda relación con el volumen de la vivienda $(230m^3)$ y las renovaciones de aire por hora (ACH) que para este caso se considerará como $2\left(\frac{1}{h}\right)$.

Componente	Valor	Unidad
ρ	1,2	$\frac{kg}{m^3}$
C_p	0,279	$\frac{Wh}{kg\ ^\circ C}$
V_{vent}	2	$\frac{1}{h}$
Volumen	230	m^3
Q_v de refrigeración	385,02	W
Q_v de calefacción	-1309,07	W

Tabla 3-6. Resumen de cálculo de cargas por ventilación.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.8. Ganancias solares sensibles mediante radiación

El sol aporta una gran cantidad de energía al local, la radiación impacta en la envolvente de la vivienda elevando la temperatura de su superficie, y esta a su vez absorbe esa energía mediante conducción (en función de la transmitancia térmica del material). Este fenómeno se aplica a cerramientos opacos como techo, muros y piso.

Para el caso de cerramientos translúcidos como las ventanas, la mayor parte de la radiación solar atraviesa el cristal, mientras que una pequeña parte se refleja y otra es absorbida por la superficie del cristal mediante conducción térmica. La radiación que atraviesa el cristal impacta en las superficies interiores del local (generalmente el piso). Dicho fenómeno se puede observar en las siguientes figuras.

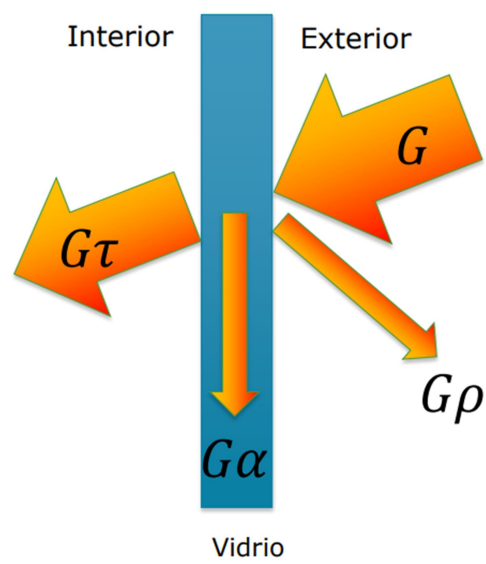


Figura 3-6. Radiación solar al impactar en un cerramiento translúcido.
Fuente:[13]

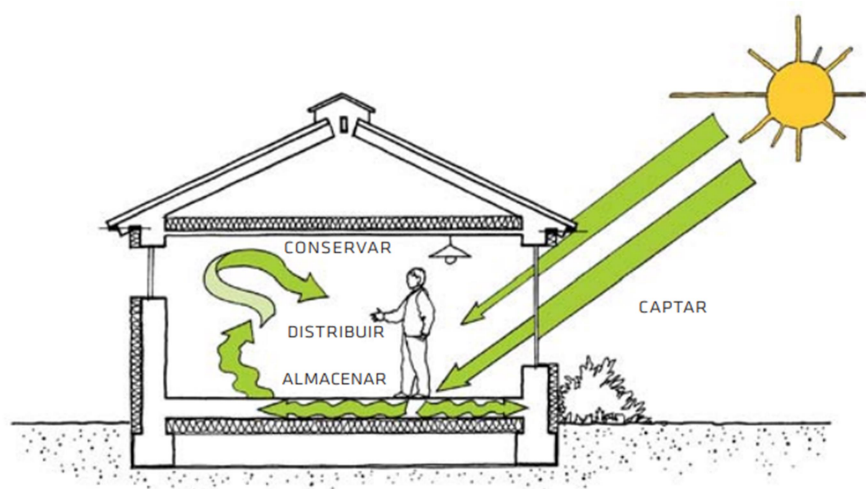


Figura 3-7. Estrategias generales para periodos de frío.
Fuente: [3].

La radiación que finalmente ingresa al recinto se designa con la siguiente fórmula:

$$Q_{sol} = S * R * f$$

Donde Q_{sol} es la carga térmica por radiación solar, S corresponde a la superficie del vidrio, R son las aportaciones solares a través del cristal y f corresponde al factor de corrección.

$$f = F_m * F_s$$

Para este caso se consideraron dos factores de corrección, F_m que corresponde al factor de marco (1,17) y F_s factor solar (0,87). Entonces $f = 1,018$

Para la obtención de las cargas térmicas por radiación solar Q_{sol} se utilizará la fórmula con los cuatro puntos cardinales, donde se utilizarán las superficies translúcidas y la radiación correspondiente a cada de ellos.

A continuación, se presentará una tabla donde se muestran los datos de cada orientación a las 4 pm del mes de diciembre. A dicha hora y mes se presentan las mayores radiaciones solares desde los cuatro puntos cardinales. Dichos datos se obtuvieron de la tabla 15 del Manual de Carrier.

Orientación	Radiación $\left(\frac{Kcal}{hm^2}\right)$	Radiación $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Superficie(m ²)	F. Corrección f	$Q(W)$	$\sum Q(W)$
N	32	37,21	5,25	1,018	198,8	4.279,2
S	32	37,21	3,23	1,018	122,3	
E	32	37,21	2,55	1,018	96,6	
O	439	510,55	7,43	1,018	3.861,3	

Tabla 3-7. Resumen de cálculo de cargas sensibles por radiación.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.9. Resumen de cargas térmicas

En la siguiente tabla se presentan los valores de cargas térmicas de la vivienda.

Indicador	Unid	Refrigeración	Calefacción
Q. de envolvente	W	1.328,60	-5.425,81
Ganancias internas sensibles	W	410	410
Ganancias internas latentes	W	180	180
Q. por ventilación	W	385,02	-1309,07
Q. por radiación	W	4.279,20	0
Total	W	6.582,82	-6.144,88
	Btu/h	22.447,4	-20.954,0

Tabla 3-8. Resumen de cálculo de calefacción y refrigeración.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se puede apreciar una carga de refrigeración de 6.58 kW, dicho valor se utilizará como referencia para la elección de la bomba de calor.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR
ENTERRADO

4.1. **METODOLOGÍA**

Para que la bomba de calor funcione correctamente esta necesita un medio al cual intercambiar la energía necesaria para suplir las necesidades del local. Este medio corresponde al subsuelo, el cual es aprovechado mediante un intercambiador de calor. Existen muchos diseños posibles, los cuales están determinados por una gran variedad de factores, es por ello que se debe realizar un buen dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado y de esta manera lograr un sistema lo más eficiente posible.

El rasgo característico y que diferencia una bomba de calor geotérmica de una aerotérmica es la estructura del intercambiador de calor que está en el subsuelo, para el caso de la BCG este se encuentra bajo la tierra y su función es depositar la energía extraída de la vivienda en verano y absorber la energía que necesita en invierno.

Para el dimensionamiento del intercambiador del intercambiador de calor se utilizará la metodología de diseño de la International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA).

El método IGSHPA para el diseño de intercambiadores enterrados está basado en la teoría de la fuente de calor en forma de una línea infinita (*Kelvin Line Source Theory*) desarrollado por Ingersoll y Plass. Según esta teoría un intercambiador de calor que cede calor al suelo se comporta como una fuente de calor con un espesor pequeño y una longitud infinita, y por tanto sólo cede calor en el sentido radial. Es un método de cálculo estático que asume que el sistema funciona durante un tiempo determinado a una carga constante y con el suelo a la temperatura más desfavorable, es decir, el mes de enero para refrigeración y el mes de julio para calefacción, y con una temperatura de agua fija. Durante los restantes meses, la temperatura del aire será más moderada, y por lo tanto la carga calorífica o frigorífica será menor. Además, el suelo no estará tan frío (en invierno) o tan caliente (en verano), lo que hará que la temperatura del agua sea más moderada y el sistema funcionará con un mayor rendimiento [2].

4.2. **ELECCIÓN DE LA BOMBA DE CALOR**

La bomba de calor está determinada por el la sumatoria de cargas térmicas obtenidas cuyo resultado corresponde a un valor de 6,58 Kw de refrigeración y -6,14 Kw de calefacción tal y como se mostró en la Tabla 3-8.

A pesar de que el mercado nacional comercializa bombas de calor este posee varias desventajas en comparación al mercado internacional; por ejemplo, tienen una oferta reducida de productos, problemas de stock, rango de potencia, poca variedad en cuanto a

las prestaciones que estas ofrecen (tecnología inverter, HTR, ACS). Por otro lado, el mercado internacional no presenta estos inconvenientes sin embargo su costo es mayor.

Tras buscar bombas de calor en el mercado nacional se concluyó que no se encontraron equipos que cubrieran las necesidades de la vivienda ya que la mayoría presentaban potencias demasiado elevadas a la requerida por la vivienda. En vista de lo anterior se eligió la bomba de calor ecoforest EcoGeo 1-9 kW. Y tiene una potencia nominal de 11kW Esta bomba cumple con las necesidades térmicas de la vivienda e incluso presenta una potencia superior a la necesaria, esto se hizo ya que esta bomba de calor elegida también ofrece ACS y por ende parte de su capacidad también se utilizará para cubrir esta función; además, las cargas térmicas se obtuvieron a partir de las temperaturas máximas y mínimas promedio de los meses más críticos, sin embargo, también se necesitará una potencia extra para aquellos días que presenten temperaturas extremas.



Figura 4-1. Bomba de calor geotérmica EcoGeo 1-9 en su versión básica y compacta.

Fuente: Catálogo Bombas de calor Ecoforest, 2022.

Entre sus prestaciones se encuentra tecnología HTR, lo cual aporta mayor eficiencia al sistema de agua caliente sanitaria, otra de sus características es la tecnología inverter (también llamada tecnología de inversor) la cual consiste en que el compresor opera con una velocidad variable, esto permite tener una temperatura constante independiente de la carga.

La ficha técnica de la bomba de calor elegida se presenta a continuación:

ESPECIFICACIONES ecoGEO+ B/C 1-9		UDS.	B1/C1	B2/C2	B3/C3	B4/C4
APLICACIÓN	Lugar instalación	-	Interior			
	Tipo sistema captación ¹	-	Geotérmico / Aerotérmico / Híbrido			
	ACS, Calefacción y Piscina	-	✓	✓	✓	✓
	Posibilidad de sistema recuperación alta temp. HTR	-	✓	✓	✓ de serie	✓ de serie
	Refrigeración activa integrada	-	-	-	✓	✓
	Refrigeración pasiva integrada	-	-	✓	-	✓
PRESTACIONES	Rango modulación compresor	%	12,5 a 100			
	Potencia calefacción ² , B0W35	kW	1,3 a 11,0			
	COP ² , B0W35	-	4,5			
	Potencia refrigeración activa ² , B35W7	kW	-	1,4 a 11,0		
	EER ² , B35W7	-	-	5,2		
	Temperatura ACS máxima sin apoyo / con apoyo ⁵	°C	63 / 70			
	Nivel de potencia acústica ⁶	db	33 a 44			
	Etiqu. energét. / ηs / SCOP W35 con control clima medio	-	A+++ / 190% / 4,84			
LÍMITES DE OPERACIÓN	Etiqu. energét. / ηs / SCOP W55 con control clima medio	-	A++ / 138% / 3,54			
	Rango temperaturas calefacción / Consigna	°C	10 a 60 / 20 a 60			
	Rango temperaturas refrigeración / Consigna	°C	5 a 35 / 7 a 25			
	Rango temperaturas captación calefacción	°C	-25 a 35			
	Rango temperaturas disipación refrigeración	°C	10 a 60			
	Presión circuito refrigerante mínimo / máximo	bar	2 / 45			
	Presión circuito de producción / precarga	bar	0,5 a 3,0 / 1,5			
	Presión circuito de captación / precarga	bar	0,5 a 3,0 / 0,7			
	Volumen / Presión máx. acumulador ACS (ecoGEO+ C)	l / bar	165 / 8			
	FLUIDOS DE TRABAJO	Carga de refrigerante R410A sin / con HTR	kg	0,8 / 0,85	1,0	
Tipo de aceite del compresor / carga de aceite		kg	POE / 0,74			
DATOS ELÉCTRICOS CONTROL	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz ⁸	-	✓			
	Protección externa máxima recomendada ⁹	-	C16A			
	Fusible circuito primario transformador	A	0,5			
	Fusible circuito secundario transformador	A	2,5			
DATOS ELÉCTRICOS BOMBA DE CALOR MONOFÁSICA	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz ⁸	-	✓			
	Protección externa máxima recomendada ⁹	-	C25A			
	Consumo máximo ² , B0W35	kW / A	2,7 / 11,8			
	Consumo máximo ² , B0W55	kW / A	3,8 / 16,5			
	Intensidad arranque mínima / máxima ⁷	A	2,8 / 5,8			
	Corrección de coseno Ø	-	0,96 / 1			
DATOS ELÉCTRICOS BOMBA DE CALOR TRIFÁSICA	3/N/PE 400 V / 50-60Hz ⁸	-	✓			
	Protección externa máxima recomendada ⁹	-	C10A			
	Consumo máximo ² , B0W35	kW / A	2,7 / 4,0			
	Consumo máximo ² , B0W55	kW / A	3,8 / 5,5			
	Intensidad arranque mínima / máxima ⁷	A	0,9 / 1,9			
	Corrección de coseno Ø	-	0,96 / 1			
DIMENSIONES Y PESO	Altura x ancho x profundidad	mm	ecoGEO+ B: 1058x600x710 · ecoGEO+ C: 1851x600x720			
	Peso en vacío (sin ensamblaje)	kg	B 184 · C 245	B 192 · C 253	B 184 · C 245	B 192 · C 253

Tabla 4-1. Especificaciones de BCG ecoGEO 1-9.

Fuente: [8].

Otro dato relevante para el funcionamiento en el intercambiador de calor es el caudal (Q), el cual corresponde a 3.300 l/h.

4.3. ELECCIÓN DEL FLUIDO CIRCULANTE

El correcto funcionamiento del sistema depende de la naturaleza del fluido que va a circular por su interior el cual se traduce en dos opciones: agua o agua con anticongelante. Si existe riesgo de congelación en el intercambiador enterrado se utilizará agua mezclada con anticongelante y si por el contrario no existe riesgo de congelación se utiliza solo agua.

En la siguiente tabla se muestran las características de las alternativas de los fluidos circulantes.

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol	Metanol
Densidad a 20 °C (g/cm³)	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12	-26
Punto ebullición °C	100	197	187	64
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371	2,47021
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	0,655	9,5	18,0	0,45
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 ⁻³	0,60	0,26	0,20	0,21

Tabla 4-2. Propiedades físicas de los fluidos.

Fuente: [2].

El fluido elegido corresponde al agua ya que posee una mayor conductividad térmica además de que el sistema no corre riesgo de congelación, es por ello que no se necesita mezclarlo con anticongelante, siendo este último mucho más costoso que el agua, además de necesitar un intercambiador de calor más grande.

4.4. ELECCIÓN DEL TIPO DE CIRCUITO

Primero que todo, hay que determinar si el circuito será abierto o cerrado. Para este caso se definió que el sistema será cerrado, es decir, que solo existirá intercambio de calor y no de fluido.

La vivienda a climatizar es de pequeñas dimensiones, por lo tanto, no es necesario realizar un sistema abierto. De esta manera se evita la necesidad de buscar napas subterráneas, las cuales son escasas y muchas veces se encuentran a gran profundidad. Además, debido al cambio climático, tanto la magnitud como la presencia de estas formaciones han ido disminuyendo en los últimos años. Incluso en caso de encontrar aguas freáticas es posible que con el pasar del tiempo esta su caudal disminuya.

Según el tipo de instalación el intercambio térmico será horizontal, es decir que el colector se extenderá a una distancia promedio de dos metros de profundidad de manera constante. Un sistema horizontal es mucho más económico que los verticales, y están hechos para locales de baja magnitud. Entre sus desventajas se encuentra el hecho de que necesitan grandes cantidades de terreno para su implementación. Además, los intercambiadores presentan la restricción de que sobre ellos no se pueden hacer perforaciones ni plantar árboles u otras instalaciones que alteren la estructura del intercambiador.

Para la instalación del intercambiador se dispone un terreno de 15x25 m² sobre el cual se construirá la vivienda (100m²) dejando un espacio libre de 275 m² para la instalación del colector. Considerando que en el espacio libre también hay que destinar un lugar para plantación de árboles y otros elementos, el resultado del espacio disponible para el

intercambiador de calor se reduce aún más. Para solucionar este problema se utilizará la variable tipo Slinky.

El intercambiador tipo Slinky ayuda a reducir significativamente el largo del intercambiador y por ende el área destinada al mismo tal y como funcionan los sistemas verticales, sin embargo, a un costo significativamente inferior.

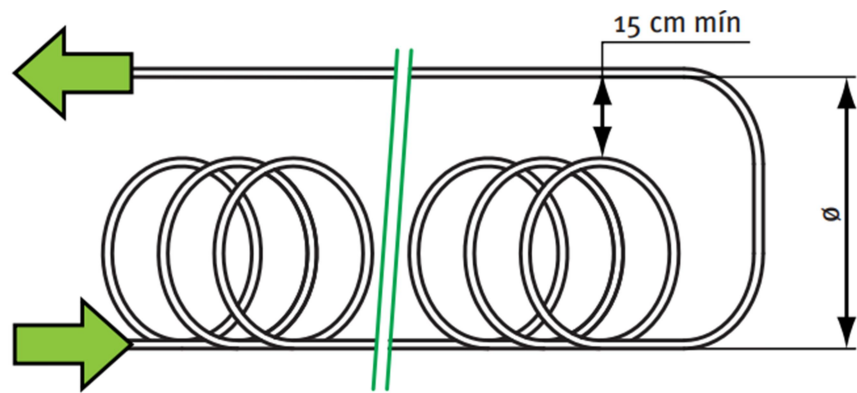


Figura 4-2. Esquema de intercambiador Slinky con espiras superpuestas.

Fuente [2].

Las principales desventajas de la configuración antes mencionada es que genera una gran pérdida de carga debido a la extensa longitud que debe tener la cañería para cubrir un área determinada. Esto provoca que se necesite una bomba de circulación con presiones muy elevadas (por ende, más costosa) las cuales podrían sobrepasar los límites especificados en la cañería. Para solucionar esta problemática se debe elegir de manera correcta la trayectoria del fluido.

La elección de configuración según la trayectoria del fluido será en **paralelo** ya que de esta manera se genera una menor caída de presión al dividir el flujo en distintas trayectorias. Otra ventaja de esta configuración es que su costo disminuye, ya que se utilizan cañerías de menor diámetro. Por otro lado, la principal desventaja del sistema en paralelo es que hay que tener cuidado al eliminar el aire atrapado en el interior de la cañería, sin embargo, lo anterior se soluciona mediante un buen sistema de purga.

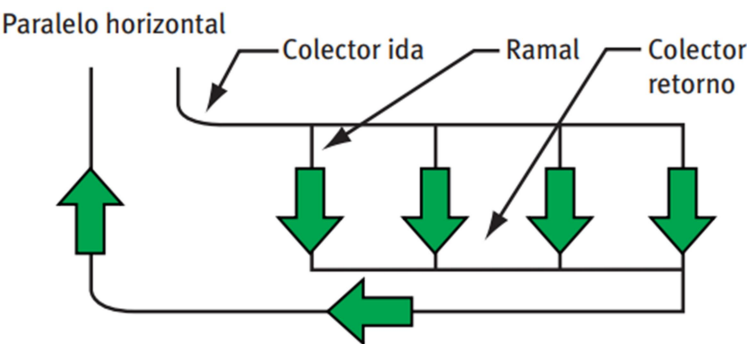


Figura 4-3. Flujo en paralelo para configuración horizontal.

Fuente: [2].

A partir de los parámetros de diseño seleccionados es posible establecer un acercamiento a la estructura final, la cual se representa en la Figura 4-4. Para la obtención del modelo definitivo es necesario el dimensionamiento del intercambiador de calor.

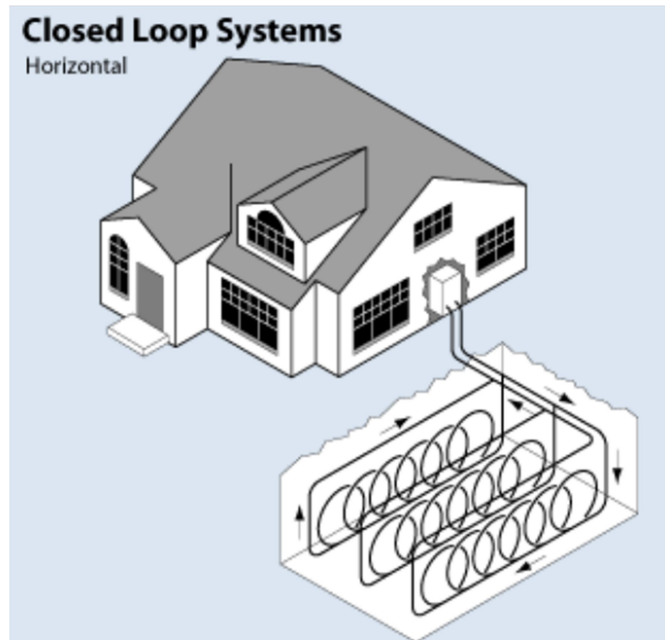


Figura 4-4. Sistema de circuito cerrado horizontal.

Fuente: <https://igws.indiana.edu/Geothermal/HeatPumps>



Figura 4-5. Ramal de circuito horizontal con tipología “Slinky vertical”.

Fuente: <https://www.cse.org.uk/advice/renewable-energy/ground-source-heat-pumps>

4.5. ELECCIÓN DE LOS TUBOS

El material seleccionado es polietileno (PE) el cual es resistente y flexible.

Para elegir el diámetro de la cañería se deben tomar en cuenta dos consideraciones. La primera es que el diámetro debe ser lo suficientemente grande como para producir una

pérdida de carga pequeña y de este modo necesitar menos potencia de bombeo, sin embargo el diámetro también tiene que ser lo suficientemente pequeño como para producir altas velocidades y así generar un flujo turbulento, de esta forma se propicia un buen traspaso de energía térmica entre el fluido y el tubo; esto se sustenta en la idea de que cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico.

A continuación, se presenta la tabla con las características de los tubos de polietileno

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

Tabla 4-3. Características de tubos de polietileno.

Fuente: [2].

En vista de lo anterior se seleccionó una tubería PE100 de 1” de diámetro nominal la cual soporta una presión de 10 Bar, tal y como se muestra en la Tabla 4-3.

Para saber si un fluido es turbulento o laminar se utiliza el número de Reynolds (Re), el cual está determinado por la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{4 * Q}{\pi * v * D} > 2.300$$

Donde *Q* es el caudal el cual tendrá un valor de 3.300(l/h) equivalente a 0,00092 (m³/s), *v* es la viscosidad cinemática del fluido, la cual, por el hecho de ser agua, tendrá un valor de 1,003 * 10⁻⁶ (m²/s). *D* es el diámetro interior de la tubería, el cual corresponde a 0.021 m (ver Tabla 4-2).

Al realizar la operación se tiene que $Re = 55.411$

4.6. VELOCIDAD MÍNIMA DEL FLUIDO

El intercambio térmico que se genere depende en parte de la velocidad del fluido, si esta última es alta el intercambiador tendrá un buen intercambio térmico.

La velocidad se define como el cociente entre el caudal y el diámetro interior del tubo, por consiguiente, el resultado de la velocidad equivale a $0,0436 \text{ m/s}$.

4.7. DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR ENTERRADO

En esta parte se revelarán variables propias del intercambiador de calor, la finalidad última del dimensionamiento es conocer la longitud total de la tubería, esto permite determinar el diseño del intercambiador de calor con mayor exactitud. La magnitud del intercambio depende directamente del largo del intercambio de calor.

Los parámetros para calcular son los siguientes:

- Temperatura máxima y mínima de la tierra.
- Temperatura máxima y mínima de entrada del fluido a la bomba de calor.
- Diferencia de temperatura entre la tierra y el circuito.
- Resistencia de los tubos al flujo de calor.
- Resistencia de la tierra.
- Longitud del intercambiador enterrado.

4.7.1. Temperatura máxima y mínima de la tierra

Como ya se ha mencionado previamente, a medida que aumenta la profundidad de la tierra, su temperatura presenta una mayor independencia de la temperatura ambiente. Para determinar su valor se utiliza la siguiente fórmula:

$$T_L(X_s) = T_m - A_s * e^{\left(-X_s * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}}\right)}$$

$$T_H(X_s) = T_m + A_s * e^{\left(-X_s * \sqrt{\frac{\pi}{365 * \alpha}}\right)}$$

Donde:

$T_L(X_s)$ es la temperatura máxima del terreno a una profundidad X_s .

$T_H(X_s)$ corresponde a la temperatura mínima del terreno a una profundidad X_s .

T_m es la temperatura media de la tierra.

A_s es la amplitud anual de la temperatura media, para circuitos verticales es cero.

α es la difusividad térmica del terreno.

e es exponencial.

Ahora se calculan las temperaturas máximas y mínimas del terreno en función de la profundidad, la cual se recomienda tener un mínimo de 1,5 m, sin embargo, se eligió una profundidad 2 m para aprovechar aún más la inercia térmica del terreno.

El valor de α será de $0,0446 \frac{m^2}{día}$, considerando el terreno como suelo ligero húmedo

T_m se obtiene a partir de la Tabla 3-1 y corresponde a $13,3^\circ C$ sin embargo al sumarle $1^\circ C$ su valor corresponde a $14,3^\circ C$.

A_s es el valor medio entre la máxima temperatura promedio el mes más cálido (enero) y la mínima temperatura promedio en invierno (ver Tabla 3-1) por ende su valor corresponde a $\frac{29-3}{2} = 13^\circ C$.

$$T_L = 14,3 - 13 * e^{\left(-2 * \sqrt{\frac{\pi}{365 * 0,0446}}\right)} = 8,93^\circ C$$

$$T_H = 14,3 + 13 * e^{\left(-2 * \sqrt{\frac{\pi}{365 * 0,0446}}\right)} = 19,73^\circ C$$

4.7.2. Temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor

Para fijar las temperaturas máximas y mínimas de trabajo (T_{MAX}, T_{MIN}) se utiliza la siguiente expresión:

$$T_{MIN} = \frac{1}{2} (T_{entrada,c} + T_{salida,c})$$

$$T_{MAX} = \frac{1}{2} (T_{entrada,f} + T_{salida,f})$$

Las temperaturas de salida del agua en modo frío y calor se obtienen a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{salida,c} = T_{entrada,c} - \frac{1000 * P_c * \frac{COP_c - 1}{COP_c}}{C_p(Q/3600)}$$

$$T_{salida,f} = T_{entrada,f} + \frac{1000 * P_f * \frac{COP_f + 1}{COP_f}}{C_p(Q/3600)}$$

Estos datos se encuentran en la ficha técnica de la BCG escogida, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Datos	Valor	Unidad
Potencia de calefacción (Pc)	11	kW
Potencia de refrigeración (Pf)	11	kW
Rendimiento de calefacción (COP _c)	4,5	kW
Rendimiento de refrigeración (COP _f)	5,2	kW
Caudal	3.300	l/h
Rango T _{entrada,c}	5	°C
Rango T _{entrada,f}	25	°C

Tabla 4-4. Resumen de datos de bomba de calor elegida.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Tabla 4-1.

Ya que el fluido de trabajo en el intercambiador de calor es agua, se utilizará un calor específico (C_p) de 4.185 $\left[\frac{J}{g^{\circ}C}\right]$.

Ahora se reemplazan los datos.

$$T_{salida,c} = 5 - \frac{1000 * 11 * \frac{4,5 - 1}{4,5}}{4.185 \left(\frac{3.300}{3600}\right)} = 2,77\text{ }^{\circ}C$$

$$T_{salida,f} = 25 - \frac{1000 * 11 * \frac{5,2 - 1}{5,2}}{4.185 \left(\frac{3.300}{3600}\right)} = 28,42\text{ }^{\circ}C$$

$$T_{MIN} = \frac{1}{2} (5 + 22,7) = 3,88\text{ }^{\circ}C$$

$$T_{MAX} = \frac{1}{2}(25 + 28,42) = 26,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.7.3. Diferencia de temperatura entre la tierra y el circuito

Para ciclos de calefacción la diferencia de temperatura se obtienen mediante la resta entre T_L y T_{MIN} , mientras que en modo refrigeración se obtiene de la diferencia entre T_{MAX} y T_H . En consecuencia, los resultados son los siguientes:

$$\Delta T_{cal} = 5,04$$

$$\Delta T_{ref} = 6,98$$

4.7.4. Resistencia de los tubos al flujo de calor

Este dato se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$R_p = \frac{1}{2 * \pi * K_p} * \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right)$$

Donde, K_p es la conductividad térmica del tubo, expresada en $\frac{W}{m * K}$, D_0 es el diámetro exterior del tubo expresado en metros y D_1 es el diámetro interior del tubo, también en metros. Dichos datos se obtienen de las características del tubo de polietileno escogido.

Finalmente, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$R_p = \frac{1}{2 * \pi * 0,43} * \ln\left(\frac{0,025}{0,021}\right) = 0,0645 \left[\frac{m^2 * K}{W} \right]$$

4.7.5. Resistencia de la tierra

La resistencia de la tierra (R_s) es la inversa a la conductividad térmica del suelo $\left(0,0856 \frac{W}{m * ^\circ\text{C}}\right)$, por ende, el valor de la resistencia se expresa como $1,156 \frac{m * ^\circ\text{C}}{W}$

4.7.6. Longitud del intercambiador enterrado

Para que se genere un intercambio térmico eficaz es necesario que el intercambiador de calor enterrado tenga la longitud adecuada, de esta manera se logra que se deposite la totalidad de calor en verano y que se extraiga una correcta cantidad de calor en invierno.

Uno de los datos necesarios para obtener el largo del intercambiador de calor es el factor de utilización (F), el cual se define como la fracción de tiempo en que está en marcha la bomba de calor en relación con el total de horas de los meses de mayor carga de trabajo (julio y enero) y se designará como 0,337 para calefacción y 0,25 para refrigeración.

El largo del intercambiador de calor (L), expresado en metros, se obtiene tanto para calefacción como para refrigeración y está determinado por las siguientes expresiones:

$$L_{calefacción} = \frac{Q_{calefacción} * \frac{COP_{calefacción} - 1}{COP_{calefacción}} * (R_p + R_s * F_{calefacción})}{T_L - T_{MIN}}$$

$$L_{refrigeración} = \frac{Q_{refrigeración} * \frac{COP_{refrigeración} + 1}{COP_{refrigeración}} * (R_p + R_s * F_{refrigeración})}{T_{MAX} - T_H}$$

Al reemplazar los datos obtenidos en la ecuación anterior, se obtienen los siguientes resultados:

$$L_{calefacción} = \frac{11.000 * \frac{4,5 - 1}{4,5} * (0,0645 + 1,156 * 0,337)}{8,92 - 3,88} = 771,4 \text{ m}$$

$$L_{refrigeración} = \frac{11.000 * \frac{5,2 + 1}{5,2} * (0,0645 + 1,156 * 0,25)}{26,71 - 19,72} = 663,8 \text{ m}$$

En base al cálculo anterior se revela la longitud total del intercambiador de calor enterrado es 771,4m, ya que es el valor más alto. A partir de este dato es posible determinar la magnitud de la instalación enterrada.

CAPÍTULO 5: **EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA**

5.1. CADENA DE VALOR

Para desarrollar un análisis estratégico de una empresa, un producto o un servicio se puede utilizar una cadena de valor, esta herramienta se presenta comúnmente en el ámbito empresarial y se aplica con la finalidad de ayudar a determinar en que se basan las ventajas competitivas o el valor de una empresa.

Al aplicar la cadena de valor en el ámbito de las bombas de calor geotérmicas, esta se puede entender como una herramienta que permite definir y agregar valor a toda la cadena de suministro además de los servicios necesarios para que un proyecto de climatización geotérmica de baja entalpía sea materializado, esto se aplica a las fases de instalación, operación y mantenimiento. De la misma manera, la cadena de valor debe contar con los elementos necesarios para poder conocer la posición del proyecto respecto de otros proyectos competidores, además de definir las distintas alternativas que permitan mejorar las ventajas competitivas sobre otras tecnologías de climatización disponibles en el mercado.

La cadena de valor se construye mediante un esquema y diagrama de flujos, los cuales exponen una serie de actividades o recursos que agreguen valor, para este caso es el proyecto de climatización geotérmica de baja entalpía.

5.1.1. Fabricación

El primer proceso de la cadena de valor de una BCG corresponde a su fabricación, la cual puede realizarse tanto en el sector nacional como en extranjero. En este último, el producto debe importarse para llegar al sector nacional en donde comienza su proceso de distribución y comercialización.

5.1.2. Distribución y comercialización

Independientes del lugar de fabricación las BCG, estas son comercializadas y distribuidas en el sector nacional. Este proceso se lleva a cabo en tres fases: Cotización, adquisición de componentes y adquisición de repuestos.

La cotización se lleva a cabo por un instalador o fabricante, el cual, a grandes rasgos realiza la labor de planificación, es por ello se encarga de determinar la demanda térmica, realizar el estudio de terreno y seleccionar la tecnología a aplicar, para finalmente hacer la planificación de la ejecución del sistema.

La adquisición de los componentes es llevada a cabo mediante un instalador y se encarga de instalar tanto los componentes principales como los componentes secundarios de la

construcción. Además de ello, abarca procedimientos tales como excavación, aseguramiento de puesta en marcha y el cumplimiento de certificación y normativas. Todo lo mencionado anteriormente se realiza tanto en los sistemas de captación como en los sistemas de emisión, además de la bomba de calor.

La adquisición de repuestos se lleva a cabo de manera esporádica y la realiza el cliente, el cual hace las labores de operación y mantención.

Para un mayor entendimiento de lo expuesto previamente se procede a exponer el esquema de la cadena de valor para la geotermia de baja potencia (mediante BCG).

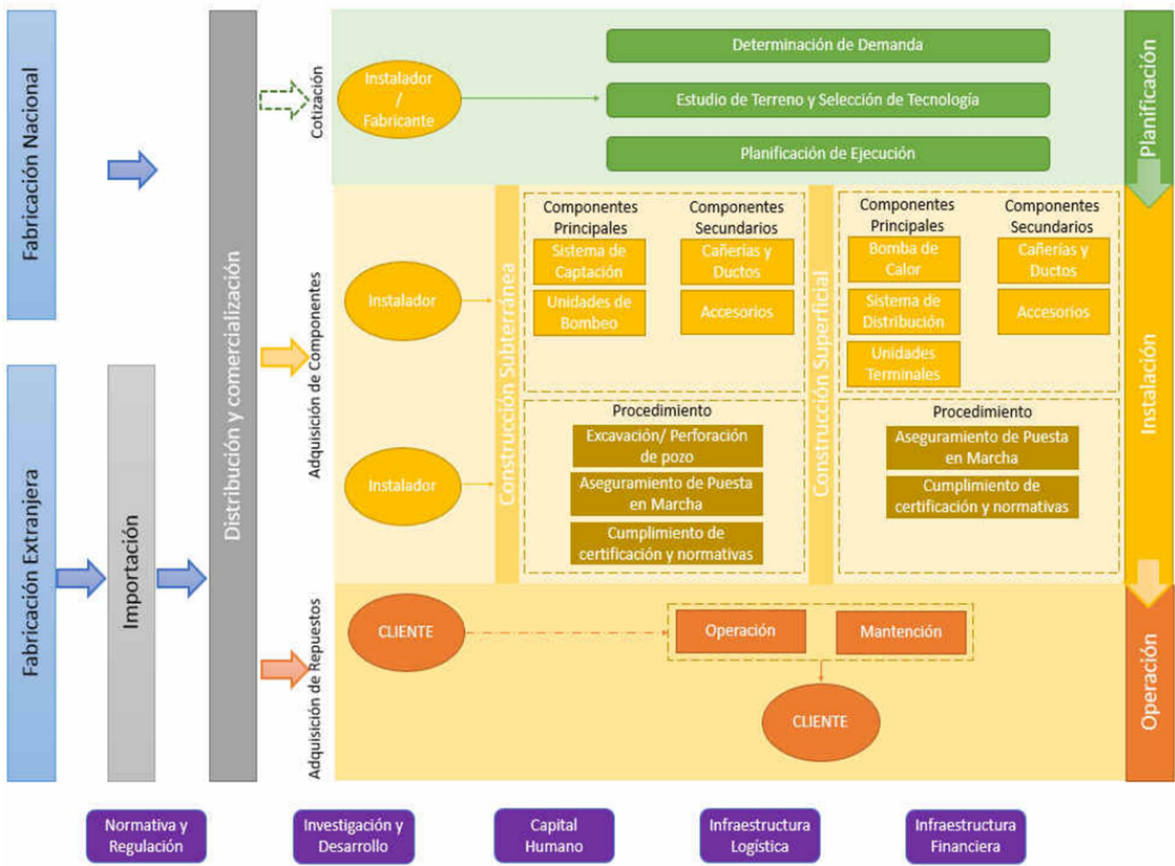


Figura 5-1. Esquema de la cadena de valor para geotermia de baja potencia.

Fuente: [16].

5.2. ANÁLISIS FODA

A continuación, se presenta un diagrama FODA con una síntesis de cada elemento. Posteriormente se profundizará cada aspecto del diagrama en donde se explicará cada punto mencionado.

<u>Fortalezas:</u> • Tiene un rendimiento de calefacción y refrigeración de 4,5 y 5,2 respectivamente • Superficie de excavación reducida • Es una tecnología limpia • Emisiones de ruido despreciables • Estabilidad en el rendimiento	<u>Oportunidades:</u> • Descentralización regional del mercado • Aumento de la presencia de esta tecnología en los últimos años • Saturación del mercado de pellet • Casos de éxito en distintas zonas del país.
<u>Debilidades:</u> • Costo de inversión inicial más alto que otras tecnologías • El terreno disponible es reducido • La vivienda a climatizar estaba previamente construida. • La vivienda es de dimensiones reducidas • Presupuesto limitado	<u>Amenazas:</u> • Prolongados periodos sin stock de productos importados • Largos tiempos de espera de productos importados • Aumento de costo de productos importados • No hay subsidios gubernamentales • Falta de mano de obra especializada en el sector • La información técnica proviene del extranjero • Falta de diversificación de esta tecnología a nivel nacional

Tabla 5-1. Análisis FODA.

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos mencionados en la figura anterior se profundizarán a continuación:

A. Fortalezas:

Rendimientos elevados: La BCG seleccionada tiene un COP de 4,5 y un ERR de 5,2 estos elevados rendimientos significan un ahorro considerable en la factura energética.

Superficie de excavación reducida: La intervención del terreno significa un impacto reducido sobre su superficie ya que al utilizar una configuración Slinky se puede concentrar el intercambiador de calor en un área bastante pequeña en relación con el largo del intercambiador de calor.

Es una tecnología limpia: A diferencia de otros tipos de energía, esta forma de climatizar no emite ningún tipo de gas invernadero.

Emisiones de ruido despreciables: Las BCG emiten un ruido insignificante, gracias a que el único elemento que podría efectuarlo es el compresor. Existen otros componentes que emiten más ruido que el compresor como las bombas de circulación, sin embargo, la contaminación auditiva de éstas también se considera insignificante para el confort del usuario.

Estabilidad en el rendimiento: Gracias a la inercia térmica del terreno el intercambio térmico de la BCG es constante a lo largo del año ya que no depende de la temperatura exterior como en el caso de las bombas de calor aerotérmicas, esto genera que no se presenten variaciones significativas en el rendimiento.

B. Oportunidades:

Descentralización regional del mercado: Hoy en día existen una gran variedad de proyectos de climatización en base a geotermia que han dado resultados favorables sobre todo en la zona sur del país, esto evidencia una descentralización de este giro comercial. Lo anterior significa grandes facilidades a la hora de abordar cualquier fase del proyecto ya que las empresas del rubro no se encontrarían solo en Santiago.

Aumento de la presencia de esta tecnología en los últimos años: Si bien la geotermia de baja entalpía es un tema poco conocido, es un hecho de que su popularidad e importancia ha aumentado en los últimos años. Esta tendencia podría generar un incremento de los actores en el mercado, aumentar la competencia y generar mayor especialización en el rubro.

Saturación del mercado de pellet: Recientemente el mercado de las estufas a pellet presenta una sobredemanda de su combustible, esta preferencia puede significar una sobreoferta de productos relacionado a la climatización mediante bombas de calor principalmente insumos como, bombas de circulación, válvulas, redes de piping, entre otros.

Casos de éxito en distintas zonas del país: últimamente existen varios sistemas de climatización geotérmica en funcionamiento para distintas aplicaciones. El éxito de estos sistemas podría evidenciar viabilidad de este tipo de proyectos, además respalda la existencia una infraestructura con el suficiente desarrollo para el éxito de este sistema.

C. Debilidades:

Costo de inversión elevado: la BCG representa gran parte de la inversión, debido su calidad, los impuestos y los aranceles extras. En general estos sistemas de climatización son conocidos por implicar un alto costo de inversión.

El terreno disponible es reducido: Esto representa una dificultad a significativa ya que, si la magnitud del terreno no es suficiente para instalar el largo requerido del intercambiador de calor, entonces la BCG no lograría los rendimientos especificados.

La vivienda a climatizar estaba previamente construida: Esto significa que se cuenta con un menor espacio para instalar el intercambiador de calor enterrado ya que cuando el terreno es reducido este puede ubicarse bajo los cimientos de la vivienda.

La vivienda tiene dimensiones reducidas: Si las instalaciones a climatizar son pequeñas el costo de inversión del sistema de BCG representa un porcentaje mayor de la inversión total de la instalación, lo cual no ocurre con grandes instalaciones residenciales, industriales y comerciales.

Presupuesto limitado: La propiedad en cuestión corresponde a una persona natural, por ende, no se cuenta con presupuestos tan elevados como lo sería en caso de que el proyecto fuese llevado a cabo por una entidad comercial o empresa.

D. Amenazas:

Prolongados periodos sin stock: Los productos que son elaborados en el extranjero presentan la desventaja de que en el sector nacional no se cuenta con stock, además, el hecho de que la climatización geotérmica sea desconocida provoca que algunos de sus insumos no se importen en grandes cantidades y por ende se generen faltas de stock.

Largos tiempos de espera de productos importados: Los productos que no se encuentran en el sector nacional tienen que importarse, lo cual tarda largos periodos de tiempo, esto dificulta la rapidez de la ejecución del proyecto.

Aumento de costos de productos importados: Los insumos y máquinas que se compran en el extranjero tienen valores mucho más altos que el sector nacional por varias razones además de la calidad que estas presenta; por ejemplo, los envíos están sujetos al arancel de importación de 6% además del IVA, correspondiente al 19%. Otra de las causas es que los países europeos donde se fabrican las BCG presentan salarios mucho más altos que en Chile, es por ello que la fabricación de estas máquinas fijan sus precios en función de ese mercado, lo cual termina generando que para Chile su adquisición sea más costosa.

No existen subsidios gubernamentales: En contraposición a lo que se podría especular, hoy en día no existen incentivos económicos que cubran de manera total o parcial la inversión de proyectos de climatización geotérmica de baja entalpía.

Falta de mano de obra especializada en el sector: Si bien existe una avanzada regionalización de esta tecnología a lo largo del país, esta tendencia es bastante incipiente, ya que el sector donde se sitúa el proyecto (Los Ángeles) no cuenta con empresas ni mano de obra especializada en este rubro.

La información técnica proviene del extranjero: Mucha de la información contenida en manuales, tablas y normas que regulan el diseño de este tipo de proyectos provienen del extranjero, lo cual genera que mucha de la información esté hecha para aplicarlo en esos sectores, en base a sus normativas, y condiciones climáticas y geográficas, otra de las desventajas es que mucha de la literatura de esta tecnología está en inglés lo cual en ocasiones dificulta su comprensión.

Falta de diversificación a nivel nacional: En nuestro país existe una oferta bastante limitada de bombas de calor ya que no presentan variedad amplia de prestaciones. Esto se evidencia en que gran parte de los proyectos en funcionamiento utilizan bombas de calor provenientes del extranjero.

5.3. TABLAS IFAS Y EFAS

Si bien la matriz FODA ofrece información valiosa acerca de una empresa o actividad y su entorno, en ocasiones los datos aportados son ineficientes o insuficientes a la hora de tomar decisiones, ya que no ofrece una ponderación o jerarquización de los elementos externos e internos. Es por ello que para mayor exactitud se recurrirá en la aplicación de otras herramientas como las tablas IFAS y EFAS.

Las tablas IFAS y EFAS son una buena herramienta para el análisis de factores estratégicos, además, ofrecen un enfoque cuantitativo de la información aportada por el diagrama FODA. De esta manera es posible encontrar espacios de oportunidad para el proyecto y las capacidades de este.

5.3.1. Tabla EFAS

La para comprender los elementos externos se utilizará la tabla EFAS (External Factors Analysis Summary) con la cual se analizarán las oportunidades y amenazas que rodean al proyecto, los factores externos serán evaluados en función de su importancia y su desempeño para afrontar estos factores externos.

La tabla EFAS se presenta a continuación:

Tabla EFAS			
Factores externos	Ponderación	Calificación	Puntuación ponderada
Oportunidades			
Descentralización regional del mercado	0,12	3	0,36
Aumento de la presencia de esta tecnología en los últimos años	0,07	2	0,14
Saturación del mercado de pellet	0,04	1	0,04
Casos de éxito en distintas zonas del país	0,07	2	0,14
Amenazas			
Prolongados periodos sin stock de productos importados	0,09	3	0,27
Largos tiempos de espera de productos importados	0,08	4	0,32
Aumento de costo de productos importados	0,11	2	0,22
No hay subsidios gubernamentales	0,12	1	0,12
Falta de mano de obra especializada en el sector.	0,09	4	0,36
Gran parte de la información técnica proviene del extranjero	0,07	2	0,14
Falta de diversificación de esta tecnología a nivel nacional	0,14	3	0,42
Total	1,00		2,53

Tabla 5-2. Tabla EFAS.

Fuente: Elaboración propia.

La calificación ponderada indica de manera cuantitativa que tan bien responde el proyecto a los factores externos. El resultado de este indicador fue de 2,53 lo cual se considera un desempeño leve sobre la media de la industria.

5.3.2. Tabla IFAS

Por otra parte, para analizar los factores internos se utilizará una tabla IFAS (Internal Factor Analysis Summary) la cual se encarga de analizar las fortalezas y debilidades. Esta tabla se encarga evaluar cada uno de los factores internos del proyecto en función de dos indicadores, la importancia de estos y la forma en que el proyecto responde a los factores.

La tabla IFAS se presenta a continuación:

Tabla IFAS

Factores internos	Ponderación	Calificación	Puntuación ponderada
Fortalezas			
Rendimiento de calefacción y refrigeración de 4,5 y 5,2 respectivamente	0,11	4	0,44
Superficie de excavación reducida	0,13	4	0,52
Es una tecnología limpia	0,09	3	0,27
Emisiones de ruido despreciables	0,08	3	0,24
Estabilidad en el rendimiento	0,08	3	0,24
Debilidades			
Costo de inversión inicial más alto que otras tecnologías	0,12	2	0,24
El terreno disponible es reducido	0,12	2	0,24
La vivienda a climatizar estaba previamente construida	0,11	2	0,22
La vivienda es de dimensiones reducidas	0,09	1	0,09
Se cuenta con un presupuesto limitado	0,07	1	0,07
Total	1,00		2,57

Tabla 5-3. Tabla IFAS.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla IFAS mediante la calificación ponderada indica que tan bien se desempeña el proyecto en cuanto a sus factores internos, para este caso el indicador corresponde a 2,57, lo cual revela un desempeño ligeramente sobre la media.

5.3.3. Objetivos a mediano y largo plazo

A partir de las tablas IFAS y EFAS junto con el análisis FODA, es posible plantear objetivos a mediano y largo plazo. Mediante la evaluación de los indicadores se pueden determinar las acciones que se deben realizar tanto para responder de mejor manera a los elementos negativos como para aprovechar las ventajas del contexto, y de esta manera aumentar las probabilidades de éxito.

A. Objetivos a mediano plazo:

- La profundidad del intercambiador de calor tendrá un valor de 2 metros de profundidad, lo cual es una cifra superior al mínimo recomendado, de esta manera se logra que se alcance la máxima eficiencia del equipo además de una mayor estabilidad en el rendimiento.

- Articular una planificación estructurada, estricta y eficiente con la finalidad de organizar los tiempos de trabajo. Esto permite realizar el proyecto de una forma más rápida y a un menor coste. Por ejemplo, se determina que mientras la BCG es transportada, de manera a paralela se realizan las fases de excavación.
- Buscar ayuda económica a entidades estatales o municipales. Si bien no existen ayudas específicas para esta tecnología, sí existen instancias en las que es posible postular a ayuda financiera. Algunas de estas entidades podrían ser el Ministerio de Medio Ambiente o el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Algunos de los equipos e insumos, como la BCG, serán comprados en el extranjero, de esta manera se evita adquirir la limitada oferta del mercado nacional y propiciar un mejor funcionamiento del sistema.
- Instalar la configuración Slinky para tener una menor área de excavación y por ende un menor coste en tiempo y dinero.

B. Objetivos a largo plazo:

- La materialización del proyecto debe concretar al menor costo posible.
- La materialización del proyecto se debe concretar en el menor tiempo posible.
- El sistema debe ser sostenible en el tiempo, procurando tener una vida útil prolongada para el máximo provecho luego del retorno de la inversión.

5.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

A partir del dimensionamiento del intercambiador de calor y la bomba de calor geotérmica es posible estimar el costo del proyecto, lo cual permite determinar su viabilidad en función del presupuesto que se tenga.

A continuación, se presenta una tabla con los valores de los distintos elementos que comprenden la instalación del proyecto.

Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Valor total
Bomba de calor eco Geo+ 1-9 versión básica	1	Unidad	\$9.392.542	\$9.392.542
Filtro retenedor de residuos de latón	2	Unidad	\$21.002	\$42.003
Manguito antivibración, de goma, con rosca de 1 1/4",	4	Unidad	\$41.612	\$166.446
Termómetro bimetálico, diámetro de esfera de 100 mm	1	Unidad	\$61.236	\$61.236
Válvula de esfera de latón niquelado para roscar de 1 1/4".	4	Unidad	\$18.785	\$75.140
Kit para llenado del circuito con glicol, con válvula de esfera de 1 1/4" y filtro de malla de 0,6 mm.	1	Unidad	\$145.534	\$145.534
Material auxiliar para instalación de calefacción con unidad agua-agua	1	Unidad	\$839.619	\$839.619
Instalación de BCG	32	Hora	\$16.510	\$528.314
Mano de obra de instalación de tubos de intercambiador de calor enterrado	32	Hora	\$13.000	\$416.000
Mano de obra instalación sistema de emisión	40	Hora	\$14.500	\$580.000
Rollo de polietileno de 25mm x 100 m	8	Unidad	\$107.900	\$863.200
Manómetro 10 bar	7	Unidad	\$8.000	\$56.000
Válvulas de bola	10	Unidad	\$13.600	\$136.000
Excavación y movimiento de terreno	8	hora	\$29.750	\$238.000
Bomba de circulación en sistema de captación Anwo 2" A80/180 XM	1	Unidad	\$354.990	\$354.990
Bomba de circulación en sistema de emisión Anwo 2" VA 55 180	1	Unidad	\$124.990	\$124.990
Fancoil	2	Unidad	\$548.400	\$1.096.799
Termómetros	4	Unidad	\$16.500	\$66.000
Filtros de agua	4	Unidad	\$28.200	\$112.800
Válvula antirretorno	4	Unidad	\$9.550	\$38.200
Válvula de purga de aire	1	Unidad	\$95.000	\$95.000
Vaso de expansión de 12 litros	1	Unidad	\$38.900	\$38.900
Válvula de 3 vías	3	Unidad	\$87.740	\$263.220
Tee de bronce 1 "	7	Unidad	\$9.709	\$67.963
TOTAL				\$15.798.898

Tabla 5-4. Tabla de costos de inversión.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se hacen las siguientes observaciones:

- A.** La bomba de calor en su versión básica con sistema HTR tenía un costo 8.390,00 euros, sin embargo, a este valor además de transformarlo a pesos se le agregó el IVA, correspondiente a un 19%, además de un arancel de importación de un 6%. Lo anterior también se aplicó a los componentes adicionales que incluía la BCG.
- B.** El valor de la instalación de la BCG seleccionada se estimó a partir del valor que cobran dos técnicos especializados en de la empresa Ecoforest. Esta cifra se modificó considerando la relación del sueldo mínimo de España y Chile, teniendo este último un factor de 0,4399 con respecto al país europeo.

C. Para el arriendo de la retroexcavadora se considera un rendimiento de 16m3/h.

El avalúo del terreno en función de su magnitud y ubicación corresponde a una cifra cercana a los 30.000 (851 UF), por otro lado, el valor de la construcción de la vivienda corresponde a \$27.000.000 (766 UF). Entonces si se considera la inversión total como la suma del costo del terreno, la vivienda y el sistema de climatización geotérmico se puede asegurar que este último representa un 27,7% de la inversión total.

5.5. CONSUMO ELÉCTRICO DE LA BCG

Para calcular el consumo del sistema se considerará que el equipo funciona en los meses más críticos un promedio de 8 horas al día. Los meses críticos en invierno corresponden a mayo, junio y julio mientras que lo de verano son diciembre enero y febrero.

A continuación, se presenta la tabla con el consumo eléctrico y el costo del este en los meses críticos. Los datos de la tarifa de la ciudad de Los Ángeles se obtuvieron de la Compañía General de Electricidad (CGE).

Dato	Unidad	Valor
Tipo de Tarifa		BT1
Cargo por energía	\$/kWh	90,338
Cargo por transporte	\$/kWh	26,865
Cargo fijo mensual	\$/cliente	1046,93
Potencia requerida	kW	2,7
Horas de trabajo	h	8
Consumo diario	kW	21,6
Consumo mensual	kW	648
	\$	
Costo mensual		76.994
19% IVA	\$	14.629
TOTAL	\$	91.623

Tabla 5-5. Consumo y costo energético de la BCG.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior revela que el costo de la energía consumida para el funcionamiento del sistema corresponde a \$91.623. En función de este dato se obtiene el costo anual del sistema el cual corresponde a \$549.741.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones se dividirán en dos partes, en un primer punto se presentan las recomendaciones a partir del aprendizaje que surgió del desarrollo de este informe y en un segundo punto de se mostrarán las conclusiones.

5.6. APRENDIZAJE Y RECOMENDACIONES

- Es importante realizar el estudio de cargas térmicas ya que desde un punto de vista ingenieril aportan datos e información precisa para poder elegir método y diseño más eficiente del sistema.
- El sistema de climatización geotérmica se recomienda para grandes instalaciones ya que las bombas de calor que existen en el mercado tienen potencias superiores a las potencias que demandan las viviendas pequeñas. Se recomienda la utilización de la geotermia de baja entalpía para calefacción distrital o comercial.

5.7. CONCLUSIONES

- En el diagrama FODA, en la sección de debilidades se clasificó la idea de que respecto a la climatización geotérmica existe un desconocimiento generalizado del sistema, lo cual significa varios problemas como por ejemplo la poca oferta de empresas que se desempeñen en el rubro o la poca demanda por parte de los consumidores; sin embargo esto también representa una ventaja potencial ya que al tratarse de un nicho de mercado en crecimiento las empresas que emprendan este rubro tendrán menos competidores en el sector nacional.
- Es preferible realizar este tipo de proyectos previo a la construcción de la vivienda ya que el espacio que se utiliza para la instalación del intercambiador de calor enterrado puede ubicarse bajo el local a climatizar, de esta manera se evita utilizar superficie que podría ser utilizada para plantaciones de árboles y elementos que interfieran en la estructura del intercambiador de calor enterrado.
- La configuración de un intercambiador de calor tipo Slinky genera una gran ventaja económica. Esto sucede porque con este sistema se reduce considerablemente el área del intercambiador, lo cual significa una disminución en el valor de los costos de excavación y movimiento de terreno.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASHRAE. Handbook. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc. Atlanta. USA. 2005.
2. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). 2010.
3. Bustamante W. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social.
4. Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G. División Técnica de Aire Acondicionado y Refrigeración. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios en Chile (RITCH). Santiago de Chile, 2007.
5. Carrier. Manual de aire acondicionado. New York.1980.
6. CORFO. Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico, Chile. 2016.
7. ECOFOREST. Catálogo Bombas de calor. Madrid. 2022.
8. ECOFOREST. Fichas Técnicas de Bomba de calor. Madrid. 2022.
9. IDAE. IGME. Manual de geotermia. Madrid. 2008.
10. Instituto Nacional de Normalización (Chile). Acondicionamiento Térmico – Envolverte Térmica de Edificios – Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas. NCh. 853. Of. 2007. Santiago, Chile: 2007. 43 p.
11. Instituto Nacional de Normalización (Chile). Aislación térmica – Transmisión térmica – Terminología, magnitudes, unidades y símbolos. NCh 849. Of. 1987. Santiago, Chile: 1978.
12. Ministerio de Energía Gobierno de Chile. Informe Balance Nacional de Energía 2020. (1a. ed.), Santiago de Chile.
13. MINVU. Curso Evaluadores Energéticos Sistema de calificación energética vivienda (SCEV). Chile.

14. MINVU. Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile. 2014.
15. MINVU. Manual de procedimientos de calificación energética de viviendas en Chile (CEV), 2019.
16. NAMA Y GIZ. Estudio de mercado bombas de calor geotérmica y aerotérmica. Chile. 2020.
17. RODRÍGUEZ Núñez, Víctor Manuel. 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 (Ingeniero Civil Mecánico). Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015.
18. Y. Cengel. Termodinámica. México: Séptima Edición. 2012.

ANEXOS

ANEXO A: GLOSARIO TÉCNICO.

- Aerotermia: Tecnología que resume a las bombas de calor aerotérmicas o que utilizan la energía o calor disponible en el aire.
- BTU/h: Unidad de potencia basada en sistema inglés, utilizada para sistemas compactos.
- Fancoil: Sistema de emisión comúnmente utilizado para calentar o enfriar aire en recintos a climatizar.
- Geotermia de baja entalpía: Aprovechamiento del calor de la tierra, está asociada a bajas temperaturas o temperatura promedio natural de la tierra.
- Inverter: Tecnología que regula automáticamente el funcionamiento del compresor interno de la BC con el fin de ahorrar energía respecto a un sistema On-Off.
- On-Off: Tecnología de encendido y apagado automático según la temperatura definida por el usuario.
- Resistencia térmica: Oposición al paso de calor que presentan los elementos constructivos.
- RoofTop: Equipos compactos que contienen en su interior todos los elementos asociados a un circuito frigorífico. Se ubican generalmente sobre techo y por ello su nombre.
- Sistemas emisores: Equipos encargados de suministrar o emitir calor y frío en los recintos o procesos objetivos. Se consideraron 3 tipos: radiadores, suelo radiante y fancoils.
- Split: Tecnología de bomba de calor aerotérmica que consistente en una unidad interior y otra exterior. Es utilizada generalmente para climatizar ambientes interiores.

ANEXO B: PRODUCTOS GENÉRICOS SIN MARCA SEGÚN TABLA A1,
NCH 853.

Nº	MATERIAL (genérico)	DENSIDAD Kg/m3	LAMBDA W/m °C
1	Agua líquida a 0 °C	1.000	0,590
2	Agua líquida a 94 °C	1.000	0,690
3	Aire quieto a 0 °C	-	0,024
4	Aire quieto a 100 °C	-	0,031
5	Adobe	1.100-1.800	0,900
6	Aluminio	2.700	210,000
7	Arcilla	2.100	0,930
8	Arcilla expandida	300	0,090
9	Arcilla expandida	450	0,110
10	Arena	1.500	58,000
11	Aserrín de madera	190	0,060
12	Asflatos	1.700	0,700
13	Azulejos	-	1,050
14	Baldosas cerámicas	-	1,750
15	Betún	1.050	0,160
16	Bronce	8.500	64,000
17	Cascote de ladrillo	1.300	0,410
18	Capotillo de arroz	117	0,060
19	Cebada	470	0,070
20	Cobre	8.930	380,000
21	Escorias	800	0,250
22	Escorias	1.000	0,290
23	Escorias	1.200	0,340
24	Escorias	1.400	0,410
25	Enlucido de Yeso	800	0,350
26	Enlucido de Yeso	1.000	0,440
27	Enlucido de Yeso	1.200	0,560
28	Enlucido de Yeso con perlita	570	0,180
29	Fibro-cemento	920	0,220
30	Fibro-cemento	1.000	0,230
31	Fibro-cemento	1.350	0,230
32	Fundición y acero	7.850	58,000
33	Grava rodada o de machaqueo	1.700	0,810
34	Hormigón armado (normal)	2.400	1,630
35	Hormigón con áridos ligeros	1.000	0,330
36	Hormigón con áridos ligeros	1.400	0,550
37	Hormigón celular con áridos silíceos	600	0,340

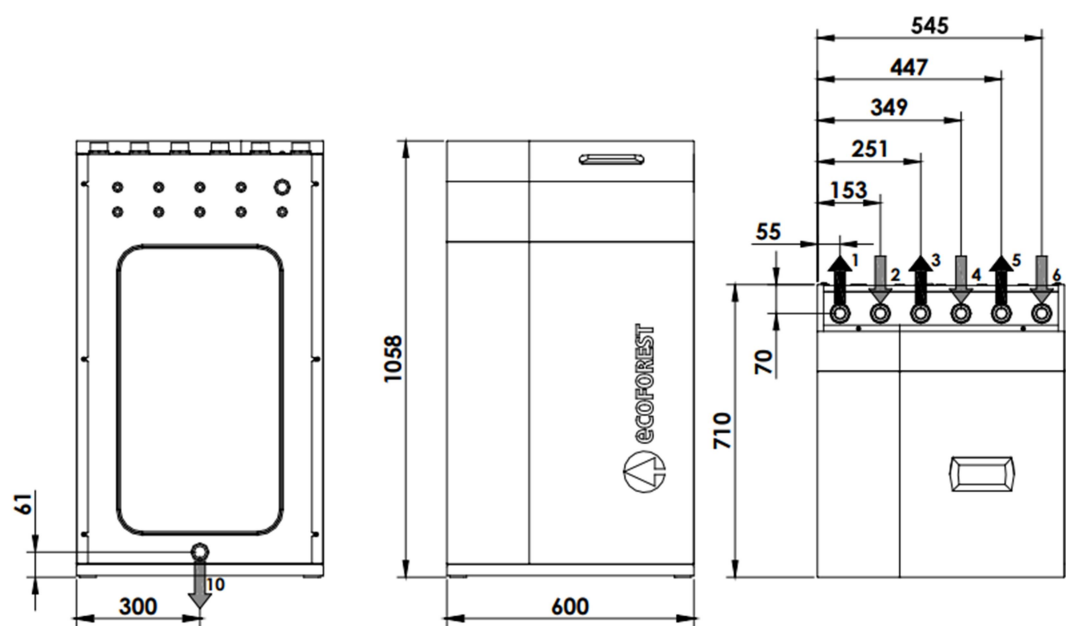
38	Hormigón celular con áridos silíceos	1.000	0,670
39	Hormigón celular con áridos silíceos	1.400	1,090
40	Hormigón celular sin áridos	305	0,090
	Hormigón en masa con grava normal:		
41	con áridos ligeros	1.600	0,730
42	con áridos ordinarios, sin vibrar	2.000	1,160
43	con áridos ordinarios, vibrados	2.400	1,630
44	Hormigón en masa con arcilla expandida	500	0,120
45	Hormigón en masa con arcilla expandida	1.500	0,550
46	Hormigón con cenizas	1.000	0,410
47	Hormigón con escorias de altos hornos	600	0,170
48	Hormigón con escorias de altos hornos	800	0,220
49	Hormigón con escorias de altos hornos	1.000	0,300
50	Hormigón normal con áridos silíceos	600	0,340
51	Hormigón normal con áridos silíceos	800	0,490
52	Hormigón normal con áridos silíceos	1.000	0,670
53	Hormigón de viruta de madera	450-650	0,260
54	Hormigón de fibras de madera	300-400	0,120
55	Hormigón de fibras de madera	400-500	0,140
56	Hormigón de fibras de madera	500-600	0,160
57	Hormigón liviano en base a cascarilla de arroz	570	0,128
58	Hormigón liviano en base a cascarilla de arroz	780	0,186
59	Hormigón liviano en base a cascarilla de arroz	850	0,209
60	Hormigón liviano en base a cascarilla de arroz	1.200	0,326
61	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	260	0,088
62	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	320	0,105
63	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	430	0,134
64	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	640	0,214
65	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	840	0,269
66	Hormigón liviano en base a poliestireno expan.	1.100	0,387
67	Ladrillo macizo hecho a máquina	1.000	0,460
68	Ladrillo macizo hecho a máquina	1.200	0,520
69	Ladrillo macizo hecho a máquina	1.400	0,600
70	Ladrillo macizo hecho a máquina	1.800	0,790
71	Ladrillo macizo hecho a máquina	2.000	1,000
72	Ladrillo hecho a mano	-	0,500
73	Láminas bituminosas	1.100	0,190
74	Lana de amianto	100	0,061
75	Lana de amianto	200	0,063

76	Lana de amianto	400	0,120
77	Lana mineral, colchoneta libre	40	0,042
78	Lana mineral, colchoneta libre	50	0,041
79	Lana mineral, colchoneta libre	70	0,038
80	Lana mineral, colchoneta libre	90	0,037
81	Lana mineral, colchoneta libre	110	0,040
82	Lana mineral, colchoneta libre	120	0,042
83	Lana mineral granulada	20	0,069
84	Lana mineral granulada	30	0,060
85	Lana mineral granulada	40	0,055
86	Lana mineral granulada	60	0,048
87	Lana mineral granulada	80	0,044
88	Lana mineral granulada	100	0,041
89	Lana mineral granulada	120	0,042
90	Lana mineral granulada	140	0,042
91	Linóleo	1.200	0,190
	Maderas		
92	álamo	380	0,091
93	alerce	560	0,134
94	coigüe	670	0,145
95	lingue	640	0,136
96	pino insigne	410	0,104
97	raulí	580	0,121
98	roble	800	0,157
99	Maderas, tableros aglomerados de partículas	400	0,095
100	Maderas, tableros aglomerados de partículas	420	0,094
101	Maderas, tableros aglomerados de partículas	460	0,098
102	Maderas, tableros aglomerados de partículas	560	0,102
103	Maderas, tableros aglomerados de partículas	600	0,103
104	Maderas, tableros aglomerados de partículas	620	0,105
105	Maderas, tableros aglomerados de partículas	650	0,106
106	Maderas, tableros de fubras	850	0,230
107	Maderas, tableros de fubras	930	0,260
108	Maderas, tableros de fubras	1.030	0,280
109	Mármol	2500-2850	2,5-3,5
110	Moquetas, alfombras	1.000	0,050
111	Morteros de cal y bastardos	1.600	0,870
112	Morteros de cemento	2.000	1,400
113	Papel	1.000	0,130
114	Perlita expandida	90	0,050
115	Plancha de corcho	100	0,040

116	Plancha de corcho	200	0,047
117	Plancha de corcho	300	0,058
118	Plancha de corcho	400	0,066
119	Plancha de corcho	500	0,074
120	Plomo	11.300	35,000
121	Pliestireno expandido	10	0,043
122	Pliestireno expandido	15	0,041
123	Pliestireno expandido	20	0,038
124	Pliestireno expandido	30	0,036
125	Poliuretano expandido	25	0,027
126	Poliuretano expandido	30	0,026
127	Poliuretano expandido	40	0,025
128	Poliuretano expandido	45	0,025
129	Poliuretano expandido	60	0,025
130	Poliuretano expandido	70	0,027
	Productos minerales en polvo		
131	(kielselgur, polvo mineral)	200	0,080
132	(kielselgur, polvo mineral)	400	0,120
133	(kielselgur, polvo mineral)	600	0,160
134	(kielselgur, polvo mineral)	800	0,210
135	(kielselgur, polvo mineral)	1.000	0,270
136	(kielselgur, polvo mineral)	1.200	0,340
137	(kielselgur, polvo mineral)	1.400	0,400
138	Rocas compactas	2500-3000	3,500
139	Rocas porosas	1700-2500	2,330
140	Vermiculita en partículas	99	0,047
141	Vermiculita expandida	100	0,070
142	Vidrio plano	2.500	1,200
143	Yeso - cartón	650	0,240
144	Yeso - cartón	700	0,260

ANEXO C: DIMENSIONES Y TOMAS HIDRÁULICAS DE LA BCG

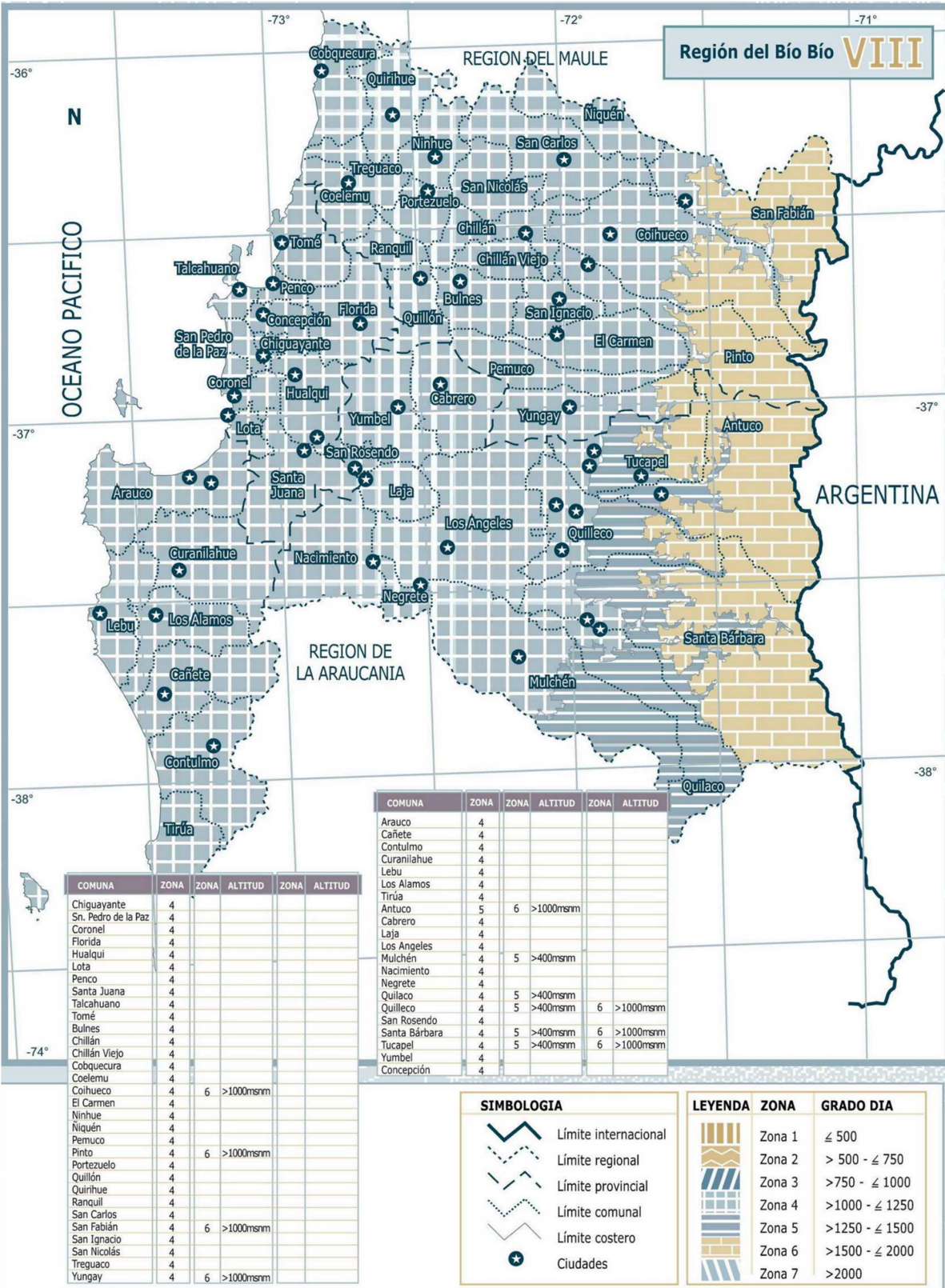
ecoGEO⁺ B



1. Impulsión Climatización - 1 1/4" M	6. Retorno intercambiador ACS - 1 1/4" M
2. Retorno Climatización - 1 1/4" M	7. Entrada AFS - 1 " H
3. Impulsión Captación - 1 1/4" M	8. Salida ACS - 1 " H
4. Retorno Captación - 1 1/4" M	9. Retorno recirculación ACS - 3/4 " H
5. Impulsión intercambiador ACS - 1 1/4" M	10. Desagüe - 16 mm

Fuente: Catálogo Ecoforest 2022.

ANEXO D: PLANO DE ZONIFICACIÓN TÉRMICA DE LA XIII REGIÓN



Fuente: <https://vaspanel.cl/download/plano-zonificacion-termica-minvu/>

