

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE
SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN CON BOMBA DE CALOR
GEOTÉRMICA PARA SALA CUNA Y JARDÍN INFANTIL EN
TALCAHUANO - REGIÓN DEL BIOBÍO**



Ahirton Cristóbal Agustín Lara Sepúlveda

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

Abril 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi familia que es el soporte principal de mi vida. También agradezco a las personas que he tenido la oportunidad de conocer en la universidad y a los que a día de hoy son mis amigos.

Un agradecimiento para los profesores con los cual tuve la oportunidad de aprender, trabajar y compartir. En especial agradezco a mi profesor tutor de memoria de título Ramón Díaz, por darse el tiempo de no solo enseñar sino también de motivar y desafiar a realizar un mejor trabajo que no finaliza en el presente documento.

Agradecer también a DHI-WASY Software GmbH por facilitar el software FEFLOW, con el cual se realizaron las modelaciones numéricas en el desarrollo de este trabajo.

Por ultimo agradecer a la Constructora AyM por prestar la información estructural y de sistema de calefacción instalado en el Jardín Infantil y Sala Cuna usado para el desarrollo de esta memoria de título.



RESUMEN

En el contexto mundial y local se hace necesario impulsar la utilización de fuentes de energías renovables que no impacten negativamente en la calidad de vida actual de las personas ni en el futuro de las nuevas generaciones. Para realizar el cambio de la matriz energética desde combustibles fósiles a energías renovables es necesario generar conocimientos en la aplicación de este último tipo de fuentes de energía.

El presente estudio se enfoca en la energía geotérmica y el diseño de una aplicación real de este recurso energético renovable.

El proyecto consiste en el diseño de una captación geotérmica de muy baja entalpía en sistema abierto con bomba de calor geotérmica para calefaccionar y producir agua caliente sanitaria en una sala cuna y jardín infantil en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío.

En primer lugar se recopila toda la información disponible para caracterizar la edificación del caso de estudio y el subsuelo.

Luego se realiza el cálculo de la demanda energética del edificio, y posteriormente, se diseña la captación geotérmica en sistema abierto con un pozo de captación y uno de reinyección, utilizando herramientas de modelación numérica y analítica. Finalmente se realiza análisis de prefactibilidad con el método del valor actual neto para definir la viabilidad del proyecto.

Los resultados obtenidos indican que el sistema geotérmico con potencia térmica de 20,3 kW es viable técnicamente para calefactor el edificio sala cuna y jardín infantil. Así mismo, el sistema logra generar ahorros en un plazo de 3 a 14 años en comparación con un sistema de calefacción convencional con caldera a gas licuado.

También se concluye que tanto modelo analítico como el modelo numérico son herramientas que ayudan a definir el potencial y diseño de la captación térmica, pero debe ser validado mediante datos medidos in-situ.

ABSTRACT

In the global and local context, it is necessary to promote the use of renewable energy sources that do not have a negative impact on people's current quality of life or the future of new generations. In order to change the energy matrix from fossil fuels to renewable energies, it is necessary to generate knowledge in the application of this kind of energy source.

The present study focuses on geothermal energy and the design of a real application of this renewable energy resource.

The project consists in the design of a very low enthalpy geothermal catchment in open loop system with geothermal heat pump for heating and produce hot water in a childcare and kindergarten in the commune of Talcahuano, Biobío Region.

First, all the available information is collected to characterize the building of the case study and the subsoil.

Then, the energy demand of the building is calculated, and subsequently the geothermal collection in an open loop system with a production well and a reinjection well is designed using numerical and analytical modeling tools.

Finally, a pre-feasibility analysis is carried out using the net present value method to define the viability of the project.

The results obtained indicate that the designed geothermal with a heating load of 20,3 kW is technically feasible for case study. The geothermal system can generate savings in a period of 3 to 14 years compared with a liquefied gas boiler heating system.

It is also concluded that both the analytical model and the numerical model are tools that help to define the potential and design of the captation system. But must be validated with in-situ measured data.

NOMENCLATURA

BCG Bomba de calor geotérmica.

COP Coeficiente de rendimiento calefacción.

EER Coeficiente rendimiento refrigeración.

CLP Pesos chilenos.

SCJI Saca Cuna y Jardín Infantil

m.s.n.m. Metros sobre el nivel del mar.

VAN Valor actual neto.

A Área [m²].

C_{aire} Capacidad calorífica del aire [J·kg⁻¹·K⁻¹]

C_{vw} Capacidad calorífica volumétrica del agua [J·m⁻³·K⁻¹].

C_{vs} Capacidad calorífica volumétrica de la fase solida del acuífero [J·m⁻³·K⁻¹].

C_u Coeficiente de utilización.

C_{si} Coeficiente de simultaneidad.

c Calor específico [kJ·kg⁻¹·C⁻¹].

F_n Flujo de costos al periodo n [CLP].

H_{agua} Calor de evaporación del agua

h_n Nivel piezométrico en el punto n [m].

I_0 Inversion [CLP]

i Gradiente hidráulico [adimensional].

K Permeabilidad [m·d⁻¹].

k_d Tasa de descuento [adimensional].

k_n Coeficientes de Tarnawski [adimensional].

N Número de personas.

n Número de equipos [adimensional].

L Distancia entre pozos [m].

P_{o_c} Potencia térmica de calefacción [kW].

P_{o_r} Potencia térmica de refrigeración [kW].

P_t Carga térmica por transmisión [kW].

P_{sv} Carga térmica sensible por ventilación [kW].

P_{lv} Carga térmica latente por ventilación [kW].

P_{sin} Carga térmica sensible por infiltración [kW].

P_{lin} Carga térmica latente por infiltración [kW].

P_{sd} Carga térmica por radiación solar directa [kW].

P_{si} Carga térmica por radiación solar indirecta [kW].

P_{se} Carga térmica sensible por equipos eléctricos [kW].

P_e Potencia eléctrica consumida [kW]

P_{le} Carga térmica latente por equipos eléctricos [kW].

P_{is} Carga térmica por iluminación [kW].

P_{so} Carga térmica sensible por ocupantes [kW].

P_{sp} Carga térmica sensible emitida por actividad de una persona [kW].

P_{lo} Carga térmica latente por ocupantes [kW].

P_{lp} Carga térmica latente emitida por actividad de una persona [kW].

P_{ACS} Carga térmica por agua caliente sanitaria [kW].

P_c Carga térmica de calefacción en invierno [kW].

P_r Carga térmica de refrigeración en verano [kW].

P_{gc} Potencia térmica exigida al terreno para calefacción [kW].

P_{gr} Potencia térmica exigida al terreno para refrigeración [kW].

Q Caudal de captación [$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$].

Q_d Flujo de Darcy [$\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$].

R_m Radiación solar promedio periodo de verano [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

R_{se} Resistencia térmica [$\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$].

r_p Radio de pozo [m].

S Coeficiente de almacenamiento [m^{-1}].

S_i Coeficiente de sombras internas [adimensional].

S_e Coeficiente de sombras externas [adimensional].

s_w Abatimiento [m].

T^w Transmisividad [$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$].

T Temperatura [K].

t Tiempo [h]

U Transmitancia [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

V_r Volumen de aire a renovar [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$].

V Volumen [m^3].

W_c Potencia térmica consumida [kW].

ΔT Diferencia de temperatura [K].

ΔH Diferencia de humedad absoluta [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$].

λ Conductividad térmica [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

ξ Coeficiente de infiltración [Adimensional].

ε_e Porosidad eficaz [adimensional].

α Absortancia [Adimensional].

ρ_{aire} Densidad del aire [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]



CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Metodología general.....	2
1.2.1 Dimensionamiento de sistema de climatización geotérmico.....	3
1.2.2 Metodología de viabilidad económica.....	3
2. Fundamentos de la geotermia.....	5
2.1 Conceptos generales.....	5
2.2 Clasificación de la energía geotérmica.....	5
2.2.1 Clasificación por viabilidad económica.....	6
2.2.2 Clasificación por temperatura.....	6
2.3 Legislación chilena sobre energía geotérmica.....	7
2.4 Explotación sostenible del recurso geotérmico.....	8
3. Geotermia de muy baja entalpía.....	10
3.1 Bomba de calor.....	10
3.1.1 Principios de operación de la bomba de calor.....	10
3.1.2 Rendimiento BCG.....	12
3.2 Sistemas de captación geotérmica.....	13
3.2.1 Distribución vertical del calor en el terreno.....	13
3.2.2 Sistemas de captación cerrados.....	13
3.2.3 Sistemas de captación abiertos.....	14
3.3 Sistemas de distribución.....	16
4. Factores de el cálculo y dimensionamiento de un sistema geotérmico de muy baja entalpía .	17
4.1 Cálculo de demanda energética de climatización.....	17
4.1.1 Confort térmico.....	17
4.1.2 Carga térmica de climatización.....	18
4.1.3 Cargas térmicas críticas de climatización.....	20
4.1.4 Gráfico de cargas térmicas en función de la temperatura ambiente.....	21
4.1.5 Demanda energética anual.....	22
4.2 Determinación de energía disponible en el terreno.....	22
4.2.1 Factores a considerar según tipo de captación.....	23

4.2.2	Potencia térmica demandada al terreno	24
4.3	Modelación de captaciones geotérmicas	25
4.3.1	Parámetros de funcionamiento	25
4.3.2	Método analítico para la evaluación de un sistema de captación abierto con recirculación mediante dos pozos	26
4.3.3	Modelo numérico de simulación para evaluar un sistema de captación	29
4.4	Evaluación económica de la instalación	30
5.	Caso de Estudio	32
5.1	Condiciones de uso del sistema de climatización	32
5.2	Características del edificio	33
5.2.1	Elementos estructurales	33
5.2.2	Sistema de climatización convencional y ventilación	33
5.3	Condiciones climáticas	34
5.3.1	Temperatura crítica	34
5.3.2	Humedad crítica	35
5.3.3	Temperatura ambiente y temperatura suelo	35
5.4	Caracterización geológica y termogeológica	35
5.4.1	Caracterización hidrogeológica	36
6.	Calculo de demanda energética	37
6.1	Cargas térmicas de calefacción	37
6.1.1	Cargas por transmisión	37
6.1.2	Cargas por ventilación e infiltración	37
6.2	Cargas por agua caliente sanitaria	38
6.3	Carga térmica crítica de calefacción	38
6.4	Carga térmica en función de la temperatura ambiente	39
6.5	Demanda térmica anual de calefacción	39
7.	Modelización de la captación	41
7.1	Variables de funcionamiento	41
7.2	Modelo analítico	41
7.2.1	Resultados	42
7.3	Modelo numérico	43
7.3.1	Hipótesis conceptuales del comportamiento del sistema	43
7.3.2	Dominio espacial del modelo	44
7.3.3	Condiciones de contorno	45
7.3.4	Distribución de parámetros hidrogeológicos y termogeológicas	45

7.3.5	Parámetros de evaluación del modelo	46
7.3.6	Resultados	47
8.	Evaluación económica	52
8.1	Costos de inversión.....	52
8.2	Costos operacionales.....	53
8.3	Casos evaluados.....	53
8.4	Resultados	54
9.	Conclusiones.....	58
10.	Recomendaciones	61
	Referencias	62
Anexo A.	Fundamentos de la geotérmica	66
A.1.	Diagrama de McKelvey	66
A.2.	Usos de la geotermia	67
Anexo B.	Geotermia de muy baja entalpía	68
B.1.	Sistema geotérmico de muy baja entalpía.....	68
B.2.	Funcionamiento bomba de calor	68
Anexo C.	Caso de estudio	69
C.1.	Ubicación del edificio SCJI	69
C.2.	Radiadores convencionales caso de estudio.....	69
C.3.	Demandas térmicas por zona climática en Chile	70
C.4.	Temperaturas promedio en Talcahuano.....	70
C.5.	Carta psicométrica.	71
C.6.	Temperatura anual Talcahuano	72
C.7.	Temperatura promedio del suelo.....	72
C.8.	Caracterización geológica en el acuífero de Talcahuano.	73
C.9.	Profundidad de basamento	75
C.10.	Valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica.....	76
C.11.	Isopiezas acuífero de Talcahuano	77
C.12.	Porosidad	77
C.13.	Permeabilidades acuífero de Talcahuano.....	78
Anexo D.	Cálculo cargas térmicas	79
D.1.	Cargas por ventilación e infiltración.....	79
D.2.	ACS	79

Anexo E.	Modelización de la captación	80
E.1.	Especificaciones técnicas de BCG seleccionada	80
E.2.	Caudal estimado	81
E.3.	Modelo con temperatura máxima	81
Anexo F.	Evaluación económica	82
F.1.	Modelo con temperatura máxima	82
Hoja Resumen Memoria de Título	¡Error! Marcador no definido.	



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Días y horarios de funcionamiento de establecimientos educaciones de nivel parvulario para el año 2018.	32
Tabla 2: Superficie de cerramientos de salas a climatizar.	33
Tabla 3: Transmitancia térmica para cerramientos de SCJI.	33
Tabla 4: Parámetros de entrada y resultados para cargas por transmisión en invierno.	37
Tabla 5: Resultado de cálculo para cargas de ventilación e infiltración en invierno.	37
Tabla 6: Parámetros de entrada para cálculo de cargas por ACS.	38
Tabla 7: Abatimientos para periodo de invierno y duración a largo plazo de captación geotérmica para diferentes profundidades de pozos.....	42
Tabla 8: Capacidad de ceder calor conjunto de radiadores.	69
Tabla 9: Temperaturas promedio mensual para Talcahuano.....	70
Tabla 10: Temperatura del aire por hora mensual en Talcahuano para el año 2018.	72
Tabla 11: Temperatura promedio mensual del suelo para el año 2018 a 10 cm en la zona de Talcahuano.	72
Tabla 12: Calculo volumen de aire a renovar por hora.	79
Tabla 13: Cargas mensuales para ACS.	80
Tabla 14: Caudal estimado por día para los meses del año, según demanda térmica para horarios de uso del edificio.....	81
Tabla 15: Consumos energéticos anuales para caso 1, 2 y 3.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología general para estudio de prefactibilidad económica de sistema geotérmico de muy baja entalpía.	4
Figura 2: Esquema del diagrama de Mollier para ciclo de refrigeración.	11
Figura 3: Ejemplo de grafico carga térmica en función de la temperatura para calefacción y refrigeración.	22
Figura 4. Grafico de demanda térmica de calefaccion en función temperatura exterior para mantener las condiciones de confort interior de invierno.	39
Figura 5: Gráfico de cargas térmicas mensuales para calefacción y ACS.	40
Figura 6: Dominio de modelo propuesto para el caso de estudio limitado por isolíneas del acuífero de Talcahuano	44
Figura 7: Condiciones de borde y propiedades de materiales en modelo simplificado 3D para captación geotérmica en circuito abierto con recirculación en FEFLOW.	46
Figura 8: Vista aérea modelo estándar resultante.	48
Figura 9: Vista en planta a -22 m.s.n.m. en modelo estándar.	48
Figura 10: Niveles piezométricos en pozos de captación en 20 años para casos evaluados.	49
Figura 11: Evolución de temperatura en el pozo de captación para casos de evaluación en modelos numéricos.	50
Figura 12: Vista en planta a -22 m.s.n.m. en los parámetros de evaluación simulados con el modelo numérico mediante FEFLOW.	51
Figura 13: Costo comparativo a 20 años mediante VAN Caso 1.	56
Figura 14: Costo comparativo a 20 años mediante VAN Caso 2.	56
Figura 15: Costo comparativo a 20 años mediante VAN Caso 3.	57
Figura 16: Diagrama de McKelvey	66
Figura 17: Usos para cada tipo de yacimiento geotermico según su temperatura.	67
Figura 18: Diseño básico de un sistema de geotermia de muy baja entalpía con bomba de calor.	68
Figura 19: Ciclo de refrigeración de vapor-compresión.	68
Figura 20: Vista aérea de Talcahuano y ubicación zona de estudio.	69
Figura 21: Demanda de calefacción y refrigeración estimada por metro cuadrado para una vivienda.	70
Figura 22: Temperaturas criticas promedio durante el año para la comuna de Talcahuano.	70
Figura 23: Carta psicométrica con unidades del SI.	71
Figura 24: Perfiles topográficos realizados en el acuífero de Talcahuano.	73
Figura 25: Perfil topográfico 4-4' del acuífero de Talcahuano.	73

Figura 26: Resultado campaña de sondeos geofísicos en el acuífero de Talcahuano.....	74
Figura 27: Perfil estratigráfico de prospección del suelo.....	74
Figura 28: Profundidad estimada de basamento en el acuífero de Talcahuano.....	75
Figura 29: Valores de conductividad térmica y capacidad calorífica volumétrica para distintos tipos de roca o formación geológica.....	76
Figura 30: Nivel piezómetro, dirección del flujo de aguas y zona de caso de estudio en el acuífero de Talcahuano.	77
Figura 31: Valores de porosidad y porosidad eficaz para distintos tipos de rocas.	77
Figura 32: Permeabilidad estimada en el acuífero de Talcahuano.....	78
Figura 33: Litros de agua a usar por persona según el uso del edificio.	79
Figura 34: Especificaciones técnica de BCG Valliant modelo VWS 220/2 y otras.....	80
Figura 35: Variación de temperatura en el pozo de captación en 20 años para caso de temperatura máxima.	81



1. INTRODUCCIÓN

Mantener una temperatura corporal estable y agradable es una necesidad fisiológica básica del cuerpo humano [1]. Por ello, la climatización de viviendas y lugares de trabajo es fundamental para satisfacer la necesidad básica de regulación térmica de las personas permitiendo desarrollar las distintas actividades humanas de mejor manera, especialmente en zonas de condiciones ambientales extremas [1]. Las viviendas y espacios que no logran proporcionar las condiciones adecuadas para sus ocupantes influyen negativamente en las condiciones de salud y calidad de vida de las personas [2].

En Chile, hay ciudades como Concepción, Temuco, Valdivia o Chiguayante donde existe un problema ambiental ligado a la calefacción de viviendas [3]. En estas ciudades la calidad del aire en épocas del año con alta demanda de calefacción es un factor de riesgo para la salud de los habitantes debido al material particulado liberado al ambiente como resultado del uso masivo de leña para la calefacción de viviendas, que es la fuente energética más accesible y barata [3].

El desafío de sustituir la calefacción de leña por una fuente de energía más amigable con el medio ambiente y a la vez asequible económicamente requiere considerar aspectos sociales, técnicos y económicos [3]. Este es un reto a nivel de país, que se denota en las diferentes políticas e iniciativas planteadas en los últimos años, como el establecimiento de bases para una gestión de calidad de aire a nivel nacional. Esta iniciativa es liderada por el Ministerio del Medio Ambiente [4].

En este trabajo se estudia la energía geotérmica de muy baja entalpía como opción para la calefacción de espacios.

La energía geotérmica engloba toda aquella energía en forma de calor que se encuentra por debajo de la superficie del terreno, y es considerada una fuente de energía renovable [5]. El uso de este tipo de energía presenta una serie de ventajas comparativas frente a otros tipos de fuentes energéticas usadas para climatización de espacios, entre ellas destacan la no generación de partículas en suspensión ni de gases de efecto invernadero en su fase de operación, competitividad económica y la capacidad de generación continua y estable [6].

La utilización de energía geotérmica de muy baja entalpía para climatización de espacios requiere el empleo de la bomba de calor, que es una tecnología madura [5]. A pesar de las ventajas ambientales que tienen las instalaciones de aprovechamiento de energía geotérmica para climatización, hay dos factores importantes que limitan su desarrollo en Chile, en primer lugar se requiere un alto capital de inversión y en segundo lugar se requiere de personal capacitado para

llevarlas a cabo [7]. Estos aspectos dificultan el acceso de la población a esta fuente energética renovable, local y limpia [8].

Para resolver estos problemas es necesario disponer de acceso a la tecnología asociada a una explotación geotérmica, profesionales capaces de mejorar el conocimiento sobre esta energía y que tengan la capacidad de diseñar e implementar proyectos a un costo competitivo [8].

1.1 OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos generales y específicos para el desarrollo de esta memoria.

1.1.1 Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es realizar un análisis de prefactibilidad técnico-económica de una captación geotérmica de muy baja entalpía para climatizar una Sala Cuna y Jardín Infantil en Talcahuano.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general del trabajo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1) Identificar los elementos principales que se deben considerar en el dimensionamiento de un sistema de climatización geotérmico con bomba de calor.
- 2) Identificar las diferentes metodologías de cálculo propuestas en la bibliografía.
- 3) Caracterizar el caso de estudio en función de la información disponible.
- 4) Definir la tipología de sistema de captación geotérmico más adecuada al emplazamiento.
- 5) Aplicar la metodología de cálculo para el dimensionamiento del sistema de climatización.
- 6) Aplicar la metodología de cálculo y dimensionar el sistema de captación geotérmica.
- 7) Evaluar la viabilidad económica del sistema de climatización geotérmico frente a un sistema convencional.

1.2 METODOLOGÍA GENERAL

El estudio de prefactibilidad pretende dimensionar el sistema de climatización mediante una bomba de calor geotérmica con un enfoque cuantitativo.

Para realizar el estudio es necesario en primer lugar dimensionar el sistema de climatización geotérmico de baja entalpía y determinar datos de entrada que permitan realizar el diseño técnico del sistema de climatización.

Posteriormente se determina la viabilidad económica del sistema, que será evaluada mediante la comparación de costos del sistema geotérmico diseñado frente a un sistema de calefacción convencional.

1.2.1 Dimensionamiento de sistema de climatización geotérmico

Se deben considerar los 3 componentes principales de un sistema geotérmico para realizar su dimensionamiento: el sistema de distribución, la bomba de calor geotérmica y el sistema de captación.

El dimensionamiento del sistema de climatización requiere en primera instancia el cálculo de la demanda energética de climatización del edificio, que se determina en función de las condiciones ambientales, las características estructurales y el uso del edificio.

Una vez calculada la demanda energética del edificio, se debe seleccionar la bomba de calor geotérmica para suplir esta demanda y diseñar el sistema distribución y el sistema de captación.

Para el diseño del sistema de captación geotérmico, se debe conocer la demanda térmica de la bomba de calor geotérmica seleccionada, y conocer las características geológicas e hidrogeológicas del emplazamiento lo que permitirá seleccionar el tipo de captación más adecuada para extraer del terreno la energía geotérmica requerida por la bomba de calor.

Una vez determinado el tipo de captación, en este trabajo se evaluará el dimensionamiento de la captación geotérmica mediante un método analítico que será complementado con simulaciones numéricas.

A partir de la información resultante, se evaluarán los efectos de la captación geotérmica en el acuífero y la sostenibilidad del recurso.

1.2.2 Metodología de viabilidad económica

El estudio de viabilidad se desarrolla mediante la metodología del Valor Actual Neto (VAN) aplicado a los sistemas de climatización por geotermia, gas licuado y pellets para un periodo de 20 años.

Los costos asociados a los sistemas son analizados bajo un estudio de prefactibilidad económica.

Si el sistema geotérmico tiene menores costos asociados en el plazo de evaluación, será considerado como viable en el caso de estudio.

En la Figura 1 se observa el esquema de metodología general para determinar prefactibilidad de un sistema geotérmico, mediante el diseño de sus componentes principales.

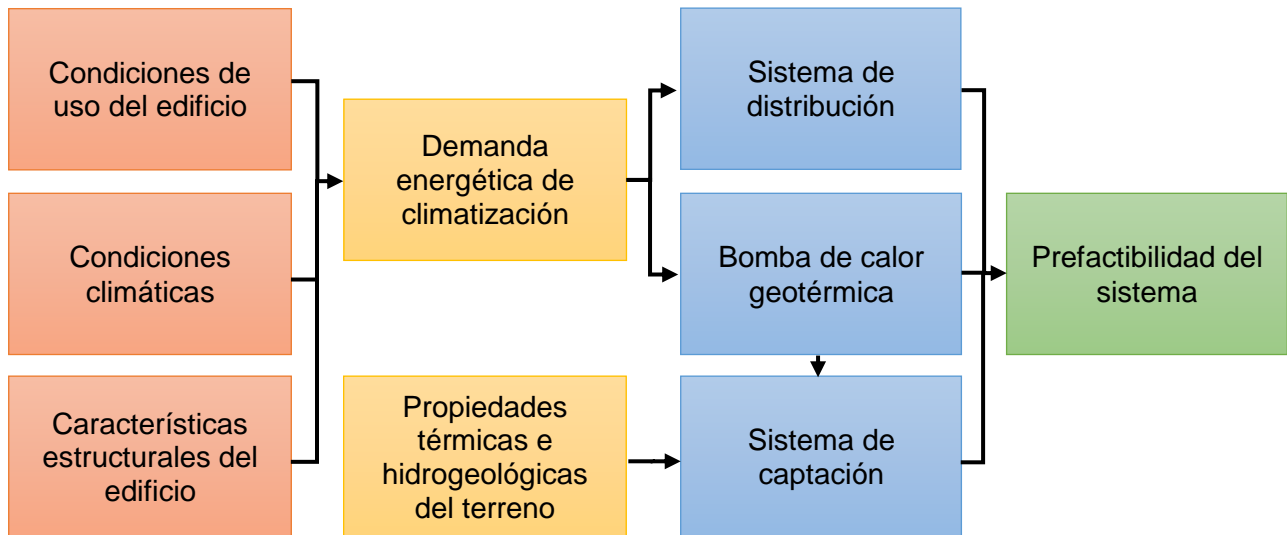


Figura 1: Metodología general para estudio de prefactibilidad económica de sistema geotérmico de muy baja entalpía.



2. FUNDAMENTOS DE LA GEOTERMIA

La geotermia es una rama de la ciencia que promueve el conocimiento y aprovechamiento de la energía almacenada en el interior de la tierra [5]. A nivel industrial, los objetivos de la geotermia son el aprovechamiento económico de los diferentes tipos de energía geotérmica para el uso humano [9].

2.1 CONCEPTOS GENERALES

Para entender el comportamiento térmico del planeta Tierra es necesario conocer su estructura y como se produce el flujo de calor desde el interior del planeta hacia su superficie exterior [10].

El calor interno terrestre tiene su origen en la desintegración de isotopos radiactivos presentes en la corteza, los movimientos diferenciales entre placas tectónicas, el calor inicial liberado en la formación del planeta y los fenómenos de cristalización de la parte externa del núcleo [11]. Este calor originado en las partes más profundas del planeta se transfiere hasta la superficie, produciéndose una tasa de renovación continua de energía geotérmica en la corteza terrestre [10].

La diferencia de temperatura en función de la profundidad que se observa en el subsuelo del planeta se define con el concepto de gradiente geotérmico, el cual representa la variación de temperatura en función de la profundidad y se expresa en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ [5]. El gradiente geotérmico en la corteza terrestre continental tiene un valor promedio a nivel mundial de $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ y es una variable fundamental en el reconocimiento del comportamiento geotérmico de un territorio y su potencial energético [5].

2.2 CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Un marco de referencia coherente para la clasificación de la energía es necesario para la exploración, reporte, evaluación y explotación [12].

Hay diferentes tipos de clasificaciones que definen la energía geotérmica, en su mayoría, están asociadas directamente con su temperatura. Se pueden clasificar según la tecnología de recuperación, el uso final de la energía, la viabilidad económica y la cantidad de energía disponible en el terreno [12].

A continuación se describen las clasificaciones según la viabilidad económica y la temperatura.

2.2.1 Clasificación por viabilidad económica

La viabilidad económica de explotar energía geotérmica está condicionada por la capacidad energética del terreno, aspectos legales y tecnológicos que permiten la recuperación energética [13].

La clasificación de la energía geotérmica según su viabilidad económica de explotación define 3 categorías; los recursos geotérmicos base, los recursos geotérmicos y las reservas geotérmicas [13].

Los recursos geotérmicos base son toda la energía geotérmica disponible bajo un área específica de terreno [13].

Los recursos geotérmicos son aquella fracción de los recursos geotérmicos base que se encuentran a una profundidad accesible, y que podrían ser explotados económica y legalmente en un futuro próximo [13].

Las reservas geotérmicas constituyen aquella porción de los recursos geotérmicos base identificados y que pueden ser explotados económica y legalmente en el momento actual [13].

El diagrama de McKelvey (Ver Anexo A.1. Diagrama de McKelvey) para recursos geológicos adaptado a la energía geotérmica ilustra esta clasificación, representando la viabilidad de explotación en función de la identificación de los recursos geotérmicos [6].

Los recursos geotérmicos identificados se convierten en reserva si cumplen con la viabilidad técnica-económica y legal [13].

El diagrama de McKelvey indica que una mayor profundidad induce un mayor costo asociado al acceso de los recursos geotérmicos, aumentando el riesgo económico de un proyecto [6].

2.2.2 Clasificación por temperatura

Esta clasificación se basa en diferenciar los recursos dependiendo de su temperatura que está intrínsecamente ligada al contexto geológico e hidrogeológico, tecnología necesaria para la explotación y el uso de la energía [5]. La clasificación agrupa los tipos de energía geotérmica en energía se dividen en recursos de muy baja, baja, media y alta entalpía.

La energía geotérmica muy baja entalpía constituye aquellos recursos que tienen temperaturas inferiores a 30 °C y son el tipo de recurso geotérmico más abundante en la corteza terrestre presentándose desde la superficie hasta los 400 metros de profundidad [5]. Esta energía puede ser utilizada para la climatización de espacios y la obtención de agua caliente sanitaria mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas [5].

La energía de baja entalpía comprende los recursos con temperaturas entre 30 °C y 90 °C. Se encuentran en cuencas sedimentarias con gradientes geotérmicos promedio de $0,03 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ o ligeramente superior. Las posibilidades de explotación de estos recursos está condicionada a una geología permeable que contenga agua y que permita extraer el calor de las rocas mediante pozos utilizando el agua subterránea como fluido calo portador [5]. Debido a que su temperatura es superior que la de superficie se puede utilizar directamente para climatización de espacios, procesos industriales o balnearios [5].

La energía geotérmica de media entalpía tiene temperaturas de 90 a 150 °C, se localizan en cuencas sedimentarias profundas, zonas de adelgazamiento litosférico, zonas con elevada concentración de isótopos radioactivos o en zonas de actividad volcánica y sísmica [6]. Este tipo de recurso están asociados a una fuente magmática de calor próxima y a un acuífero con presión y temperatura confinada suficientes para ser utilizada en la generación de electricidad [5].

La energía geotérmica de alta entalpía se presenta en rocas calientes a más de 150 °C de temperatura. Se encuentra en zonas con gradientes geotérmicos extraordinariamente altos de hasta $0,3 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ y está asociada a fenómenos de actividad volcánica recientes en regiones situadas en los bordes de placas tectónicas. Estos fenómenos son producidos por la liberación de energía desde el interior de la tierra hacia el exterior, donde el calor se transmite a través de fenómenos de convección del magma [5]. Debido a las altas temperaturas presentadas en estos recursos, es posible la generación de energía eléctrica mediante plantas de ciclo de vapor [6].

Los usos y aplicaciones de los diferentes tipos de energía geotérmica son diversos, véase Anexo A.2. Usos de la geotermia.

2.3 LEGISLACIÓN CHILENA SOBRE ENERGÍA GEOTÉRMICA

En Chile, el marco legal y regulatorio específico para el desarrollo de la energía geotérmica viene dado por la Ley N° 19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmicas [14] promulgada a fines del año 1999 [15].

La definición de energía geotérmica dada por la legislación chilena es “aquella que se obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin” [14] y donde se expresa que esta es un bien del estado en cualquier lugar, forma o condición que se manifieste y es susceptible de ser explorada y explotada previo otorgamiento de una concesión [15].

Los dos tipos de concesiones geotérmicas definidas por la Ley y denominadas concesiones de exploración y explotación geotérmicas [14] son requisito para realizar las actividades que involucran el reconocimiento y explotación de una reserva geotérmica, las cuales otorgan un derecho real inmueble sobre el recurso geotérmico [15]. A pesar de esto, la legislación de energía geotérmica chilena no distingue clasificación por temperatura de los recursos geotérmicos y define a toda explotación geotérmica como el “conjunto de actividades de perforación, construcción, puesta en marcha y operación de un sistema de extracción, producción y transformación de fluidos geotérmicos en energía térmica o eléctrica” [14].

La ley N° 19.657 no hace referencia a la energía geotérmica de muy baja entalpía, dando lugar a un vacío legal respecto a cómo proceder con una explotación de esta categoría [15], lo que genera problemas en el desarrollo de la industria.

A pesar de esto y debido a que la captación geotérmica de muy baja entalpía tiene efectos sobre el medio del cual se extrae el recurso calor, se deben considerar los aspectos legales que regulan tanto el medio ambiente como el aprovechamiento de aguas en el caso que corresponda [16].

La ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente [16] indica que cualquier actividad que pueda causar un impacto significativo sobre los recursos naturales o la salud de las personas debe ser evaluada por el Servicio de Evaluación Ambiental [16], lo que implica realizar estudios previos de las actividades u obras derivadas de captaciones de muy baja entalpía.

La Dirección General de Aguas es la institución encargada de identificar los posibles impactos por aprovechamiento de recurso hídrico subterráneo, así como de otorgar concesiones de aprovechamiento según el Código de Aguas de Chile [16]. Lo que debe tenerse en consideración en caso de usar agua subterránea como recurso geotérmico.

En el año 2019 se promulgó una modificación a la ley N° 19.657 para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de muy baja entalpía, donde se propone añadir la distinción de recursos geotérmicos de alta y baja entalpía, así también como definir una entidad fiscalizadora que permita tener registro y control del recurso [17].

2.4 EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DEL RECURSO GEOTÉRMICO

Una de las principales cuestiones sobre el desarrollo de proyectos de energía geotérmica es su sostenibilidad, por ello es necesario entender los mecanismo de renovación natural que permiten a la energía geotérmica ser una fuente sostenible en el tiempo [18].

Una reserva geotérmica en explotación se puede considerar como un sistema constituido por tres elementos principales, un medio geológico que hace las funciones de depósito de calor, un mecanismo de extracción de calor constituido por un fluido calo portador y una fuente de calor que permite la renovación natural de la reserva geotermia [19].

Si la extracción de la cantidad de energía geotérmica del terreno no supera la tasa de renovación natural de calor se puede alcanzar un estado de equilibrio térmico que permita la sostenibilidad del recurso. En cambio, sí existe una extracción de calor mayor a la tasa de renovación natural, la reserva geotérmica podría agotarse [20].

La renovación natural de calor en el terreno está condicionada por los mecanismos de transferencia de calor que se dan en su interior. El conocimiento de estos mecanismos es esencial para determinar una forma de explotación que garantice la sostenibilidad del recurso geotérmico [21].

Una variable importante asociada a los fenómenos de transferencia de calor por conducción que se dan de forma natural en la corteza terrestre es el flujo de calor geotérmico. El flujo de calor geotérmico puede estimarse mediante la ley de Fourier conocidos el gradiente geotérmico y la conductividad térmica de las rocas y fluidos presentes [5]. El promedio de flujo geotérmico a nivel mundial es de aproximadamente $65 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ [10], pero existen regiones continentales asociadas a actividades volcánicas y sísmicas con flujos geotérmicos superiores a $80 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ [10].

3. GEOTERMIA DE MUY BAJA ENTALPÍA

Los recursos geotérmicos más abundantes en el mundo son los constituidos por la energía geotérmica de muy baja entalpía, que se encuentra en la franja más superficial de la corteza terrestre y tienen temperaturas inferiores a los 30 °C. El uso principal de esta energía es la climatización de espacios y la producción de agua caliente sanitaria (ACS).

En este apartado se describen los fundamentos y componentes que permiten el funcionamiento de una instalación de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía. Estos componentes principales de la instalación (ver Anexo B.1) son la bomba de calor, el sistema de captación y el sistema de distribución o aprovechamiento final del calor [5].

3.1 BOMBA DE CALOR

La bomba de calor es una máquina térmica que permite llevar el calor desde un foco frío a uno más caliente mediante un aporte de energía eléctrica [26,27]. En el caso de una aplicación geotérmica de calefacción el foco frío será el terreno y el foco caliente será el espacio a calentar. En refrigeración en cambio, el espacio a enfriar será el foco frío y el terreno el foco caliente [22].

Las bombas de calor pueden ser clasificadas según el medio con el cual interactúan para adquirir energía térmica sea aire, agua o tierra; cuando las fuentes de calor son el agua o el terreno, son denominadas bombas de calor geotérmicas (BCG) [23].

En una instalación de climatización geotérmica, la BCG extrae la energía geotérmica proveniente del sistema de captación geotérmico.

La elección de la BCG adecuada para cada proyecto dependerá de variables de funcionamiento del sistema como; la carga crítica demandada, los rangos de temperatura de entrada y salida en las que la máquina opera, el rendimiento, el caudal nominal de alimentación y la variación de temperatura nominal en el caudal de alimentación [5].

3.1.1 Principios de operación de la bomba de calor

Los principales elementos de la bomba de calor son; el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador [22].

Estos componentes de la bomba de calor conforman un circuito cerrado por el cual circula un fluido refrigerante de bajo punto de evaporación, encargado del transporte de energía térmica y sometido a un ciclo termodinámico de Carnot que se produce de forma continua [22].

El ciclo de funcionamiento de la BCG para un sistema de calefacción sigue las siguientes cuatro etapas según el diagrama de Mollier (Figura 2).

1) La energía captada desde el terreno es dirigida hacia el evaporador donde el fluido refrigerante interno de la bomba de calor capta esta energía geotérmica y se evapora a presión y temperatura constante, aumentando su entalpía y entropía.

2) El fluido refrigerante en estado gaseoso es aspirado por el compresor que mediante un aporte de electricidad, este realiza el trabajo mecánico necesario para aumentar la presión, temperatura y entalpía del fluido manteniendo su entropía.

3) El fluido refrigerante en estado gaseoso a alta presión y temperatura pasa al condensador donde cede el calor al sistema de distribución, generando una disminución en la temperatura del fluido hasta alcanzar el punto de vapor saturado. Este proceso continúa a presión constante cediendo energía al sistema de distribución, manteniendo constante la temperatura del fluido refrigerante y culminando en su condensación, disminuyendo su entropía y entalpía en el proceso.

4) El fluido refrigerante ya en estado líquido se introduce en la válvula de expansión que disminuye su presión y temperatura, aumentando la entropía y manteniendo su entalpía constante, pre-acondicionando el fluido a una temperatura adecuada antes de entrar nuevamente al evaporador y repetir el ciclo [23].

Ver Anexo B.2. Funcionamiento bomba de calor, para visualizar el ciclo de la BCG.

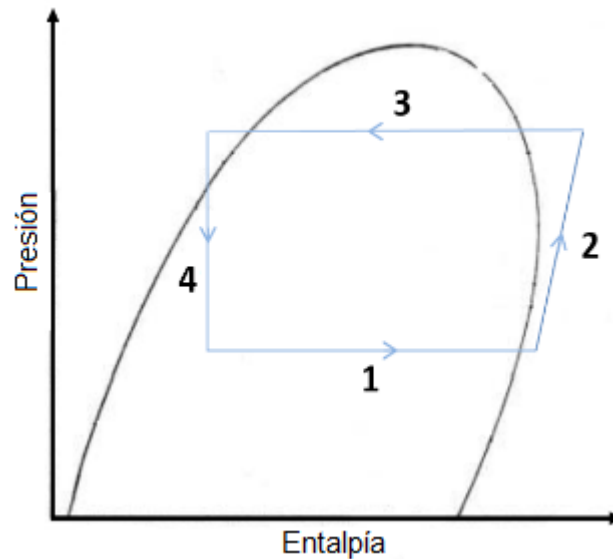


Figura 2: Esquema del diagrama de Mollier para ciclo de refrigeración.

Las BCG también pueden funcionar en modo de refrigeración, de modo que el sistema funciona en sentido inverso, en este caso la fuente de calor es la vivienda o edificación y el destino del calor es el subsuelo donde se disipará la energía térmica resultante del proceso [24].

3.1.2 Rendimiento BCG

El rendimiento de una bomba de calor se evalúa mediante el coeficiente de operación (COP) cuando el circuito funciona en modo calefacción y mediante el coeficiente de eficiencia de refrigeración (EER) cuando funcione en modo refrigeración. En ambos casos cuanto mayor sea el valor mayor será la eficiencia de la bomba de calor [23].

El COP representa la relación entre la potencia térmica de calefacción final entregada por la BCG al sistema de distribución final del calor y la potencia eléctrica consumida el compresor.

El COP de la BCG se expresa con la Ecuación (1), donde P_c es la potencia térmica de calefacción [kW] y W_c , es la potencia eléctrica consumida por el compresor [kW] [25].

$$COP = \frac{P_{o_c}}{W_c} \quad (1)$$

De forma semejante, el rendimiento de la bomba de calor en modo de refrigeración (EER) se expresa mediante la Ecuación (2), que representa la relación entre P_r que es la potencia térmica de refrigeración [kW] y W_c que es la potencia eléctrica consumida [kW] [25].

$$EER = \frac{P_{o_r}}{W_c} \quad (2)$$

Estas ecuaciones sólo son válidas para la bomba de calor, por lo que si se desea saber el rendimiento global del sistema geotérmico se deben considerar todos los consumos eléctricos que hacen posible el funcionamiento del sistema de climatización [23].

Es importante tener en cuenta que el COP real o de operación de la máquina térmica es medido con una temperatura de entrada de 0 °C y su caudal nominal [26]. Por esta razón, el valor del COP debe ser ajustado a la temperatura de entrada en el caso de estudio para conocer el rendimiento operacional real de la BCG.

La aproximación de Tarnawsky (3) es una función que relaciona el COP nominal y operacional de la BCG [27].

$$COP_{operación} = COP_{nominal}(k_0 + k_1 \cdot T_e + k_2 \cdot T_e^2) \quad (3)$$

Donde k_0 , k_1 y k_2 son los coeficientes de Tarnawski y T_e es la temperatura de entrada a la BCG.

Los coeficientes k_0 , k_1 y k_2 en el caso de calefacción son 1,00; $1,56 \cdot 10^{-2}$ y $-1,59 \cdot 10^{-4}$ respectivamente.

3.2 SISTEMAS DE CAPTACIÓN GEOTÉRMICA

El objetivo del sistema de captación geotérmica es acceder al recurso geotérmico contenido en el terreno y llevarlo hasta el evaporador de la BCG [22]. En calefacción se encarga de extraer calor desde el suelo y en refrigeración de disipar la energía en el terreno [20].

3.2.1 Distribución vertical del calor en el terreno

En condiciones normales la temperatura del terreno se estabiliza aproximadamente a partir de los 15 metros de profundidad, siendo la temperatura de equilibrio igual a la temperatura media ambiente de la zona [28].

Sobre esta profundidad la temperatura del terreno varía debido al efecto de las condiciones climáticas en superficie [28].

Por debajo de esta profundidad la temperatura del terreno dependerá de las propiedades térmicas de las formaciones geológicas existentes, del contenido de fluidos y del flujo geotérmico en la zona [28].

La estabilidad térmica del subsuelo es lo que permite el aprovechamiento de la energía con fines de calefacción y obtención de ACS [20], que puede ser fuente de calor o frío según las condiciones ambientales en superficie.

El medio de transporte de la energía geotérmica captada del terreno es un fluido que interactúa directa o indirectamente con el terreno [5]. En función de esto se identifican dos tipos de sistemas de captación, los sistemas abiertos y los sistemas cerrados [5].

3.2.2 Sistemas de captación cerrados

Los sistemas de captación cerrados están compuestos por un intercambiador de calor enterrado en el terreno, que consiste en un circuito cerrado de tuberías por el cual fluye un fluido con anticongelante, que es el encargado del transporte de calor entre el terreno y la BCG [18].

Estos sistemas se pueden clasificar en sistemas de captación horizontal y sistemas de captación vertical diferenciados por la orientación geométrica del intercambiador de calor enterrado [5].

Los sistemas de captación horizontal tienen una geometría y extensión horizontal, que se encuentra dispuesta en la franja más superficial del terreno. Este tipo de captaciones realiza el intercambio de calor en la parte del terreno donde la radiación del sol y la temperatura ambiente aún tienen incidencia y que está por encima de la zona de equilibrio térmico del terreno [28]. El circuito del intercambiador es una red de tuberías que se instalan en zanjas a 1 m o 2 m de profundidad, dejando el área de instalación sin árboles o estructuras que puedan dañar el circuito enterrado [18]. El área de instalación del sistema de captación requiere una extensión entre 1,5 a 3 veces la superficie climatizar, por lo que la utilización de estos captadores requiere parcelas con una superficie utilizable importante, lo que limita la implementación de este tipo de captaciones [18].

Los sistemas de captación vertical o sondas geotérmicas son el tipo de intercambiador geotérmico más utilizado. La disposición geométrica del intercambiador es vertical y requiere de perforaciones que comúnmente alcanzan profundidades que varían desde 70 m hasta los 150 m y con diámetros de perforación de 15 cm a 30 cm [24]. Para la instalación de una sonda geotérmica es necesario realizar una perforación, en la cual se introduce el intercambiador geotérmico que se sella con un relleno termo activo con el fin de mejorar el intercambio térmico entre la sonda y el terreno [5].

Si bien los sistemas cerrados horizontales son más económicos, estos ocupan una superficie de mayor área y son afectados por las condiciones ambientales de temperatura ambiente y la radiación solar. En cambio, la sonda geotérmica es influenciada principalmente por el flujo de calor geotérmico pudiendo así entregar una potencia constante que no hace uso de un área significativa en superficie y si es correctamente instalada puede llegar a tener una vida útil de hasta 50 años [18].

3.2.3 Sistemas de captación abiertos

Los sistemas de captación abiertos son aquellos que extraen físicamente mediante perforaciones verticales el agua presente en un acuífero [20]. Una vez realizado el intercambio de calor con el agua subterránea extraída, esta puede ser reinyectada al acuífero para no alterar la disponibilidad de agua subterránea [22].

El principal aspecto técnico de un sistema abierto de captación geotérmica es confirmar la presencia de un acuífero explotable para lo cual es recomendable realizar ensayos de bombeo que permitan evaluar las capacidades hidrogeológicas del acuífero [29]. Así mismo, es necesario contar con al menos un pozo de captación de agua y en caso de considerar la reinyección del agua del acuífero es necesario un pozo adicional [22].

Existen dos tipos de sistemas de captación abierto que se clasifican según sus capacidades de uso, en sistemas de recirculación o sistemas de almacenamiento térmico subterráneo en acuíferos [5].

Un sistema geotérmico abierto de recirculación es el que destina un pozo fijo para la captación de agua desde el acuífero y otro pozo fijo para la reinyección de agua. El flujo de agua es siempre mono direccional desde el pozo de producción al de reinyección [29]. En estos sistemas es importante evaluar la generación de una pluma de interferencia térmica entre los pozos debido a la reinyección de agua a diferente temperatura en el acuífero [20]. Con el fin de lograr mantener un balance energético anual entre el calor retirado desde el acuífero y la capacidad de disipación térmica del medio, para mantener la sostenibilidad del recurso y el funcionamiento de la instalación de climatización con un rendimiento adecuado [29]. Generalmente en estos sistemas el pozo de reinyección se instala aguas abajo del pozo de captación para retrasar o impedir la interferencia térmica entre pozos [22].

En los sistemas geotérmicos abiertos de almacenamiento térmico subterráneo en acuíferos, se almacena estacionalmente energía térmica en un acuífero [29]. Este tipo de sistemas presenta un flujo bidireccional del agua extraída que variará su sentido según sea la demanda de energía térmica del usuario desde los denominados pozos frío y caliente [29]. Los pozos son denominados según el contenido térmico que se les inyecta, de tal manera que hacia el pozo caliente va dirigida agua a una mayor temperatura que la del acuífero y por el contrario hacia el pozo frío se inyecta el agua a una menor temperatura que la extraída. Esta acción permite aumentar los rendimientos de la BCG al usar un fluido reacondicionado artificialmente [5].

Es importante mencionar que un pozo de producción generalmente está constituido por una perforación con entubación y rejilla de protección, un relleno filtrante, una bomba sumergible, una tubería de impulsión de agua, un cabezal brocal y un medidor de nivel [29].

Además, el agua extraída desde el pozo de captación puede circular directamente hacia la bomba de calor o hacia un intercambiador intermedio donde cederá calor a un circuito hidráulico conectado a la BCG con el fin de evitar problemas asociados a la química del agua que provoquen la obstrucción del evaporador y deterioro de la maquina térmica [20].

Lo que hace llamativo a las captaciones abiertas es que para una misma demanda energética el coste de acceso al recurso térmico será menor que el de un sistema cerrado vertical, siempre y cuando este conlleve a una menor cantidad de metros lineales de perforación para acceder al recurso hídrico a un coste reducido [31,34].

3.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo del sistema de distribución es suministrar la energía que emite la BCG a los espacios que demanden calor o frío, usando agua como medio de transporte de la energía térmica [8,32].

Los intercambiadores de calor son el elemento esencial del sistema de distribución y estos están diseñados para intercambiar calor entre dos fluidos [7]. En sistemas de climatización geotérmicos se utilizan intercambiadores específicos para bajas temperaturas, permitiendo que el sistema alcance un mayor rendimiento [31].

Los intercambiadores de calor para climatización de espacios más usados en conjunto con un sistema geotérmico son; el radiador de baja temperatura, el ventilo convector y el suelo radiante [32].

El radiador de baja temperatura es el dispositivo más común y el mayormente utilizado por su economía y alta eficiencia en el intercambio de calor agua-aire.

El ventilo convector es un radiador de baja temperatura con un ventilador acoplado que permite mejorar la rapidez de transferencia de calor, aunque presenta un costo más alto que un radiador de baja temperatura.

El suelo radiante es un intercambiador instalado como parte de la losa del suelo, paredes o techo, y es la solución con mayor costo asociado pero también es la opción de mayor eficiencia y eficacia en la climatización de espacios [39,37].

En paralelo al uso de este tipo de sistemas de distribución para el uso de energía de muy baja entalpía se requiere un alto estándar de aislación y hermeticidad en la edificación para evitar pérdidas de energía y alcanzar un mayor grado de eficiencia energética [32].

4. FACTORES PARA EL CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO DE MUY BAJA ENTALPÍA

Para dimensionar un sistema de climatización geotérmico de muy baja entalpía se debe seguir una metodología que integre las variables de cálculo que resuelven el problema de climatización presentado por el usuario. Para resolverlo, se requiere determinar la demanda energética de climatización, seleccionar una BCG, determinar la energía requerida al terreno, diseñar el sistema de captación geotérmica y evaluar los costos asociados a la realización y operación del proyecto [5].

Finalmente, los costos asociados a la instalación y utilización del sistema geotérmico definirán si el proyecto será viable para el usuario final [34].

4.1 CÁLCULO DE DEMANDA ENERGÉTICA DE CLIMATIZACIÓN

La demanda energética es determinada en función de la cantidad de energía térmica requerida por el usuario que depende de factores externos e internos de la estructura a climatizar y el uso del edificio, que en su conjunto definirán las horas de funcionamiento del sistema de climatización y la potencia crítica de climatización [5]. Una vez definida la potencia crítica de climatización demandada se selecciona una BCG que satisfaga los requerimientos energéticos requeridos [29].

La demanda energética solicitada por el usuario es la base del dimensionamiento de un sistema de climatización y condicionará la capacidad requerida de la BCG, la capacidad de captación térmica del terreno y los costos asociados al proyecto [30].

Para realizar una evaluación de demanda térmica es necesario describir condiciones ambientales, las consideraciones de uso, características estructurales que afectan el comportamiento térmico al interior del edificio y las condiciones objetivo del espacio para determinar las cargas térmicas críticas y el consumo energético anual en función la temperatura [30].

4.1.1 Confort térmico

El confort térmico es la sensación subjetiva de estar en un ambiente térmico agradable para un individuo, y el objetivo de un sistema de climatización es entregar esta condición térmica en un espacio determinado, generando un ambiente aceptable para la mayoría de personas [35].

El confort térmico se ve afectado por factores que influyen en la sensación térmica de una persona como son la temperatura del aire, la temperatura de objetos y paredes, la humedad relativa, la velocidad del aire, la actividad física, el metabolismo y la clase de vestido que usan las personas al interior de un espacio [36].

En Chile las condiciones de confort térmico establecidas para el interior de un edificio son de 24 °C de temperatura y 50% de humedad relativa en verano, para invierno se mantiene el valor de humedad relativa pero con un objetivo de 20 °C de temperatura [30].

4.1.2 Carga térmica de climatización

La carga térmica es la cantidad de calor que debe ser introducido o extraído de un espacio para alcanzar en su interior el estado de confort térmico [5].

Las cargas térmicas de climatización de un espacio se calculan través de la suma total de las cargas sensibles y cargas latentes que afecten las condiciones térmicas del espacio en un momento dado [37]. Las cargas sensibles serán aquellas que aportan energía directamente al aumento de temperatura y las cargas latentes son las que generan una variación en la humedad del medio [37].

Las cargas térmicas consideradas en el cálculo de la demanda energética de climatización son las cargas por transmisión, las cargas por ventilación e infiltraciones, las cargas por radiación solar, las cargas internas y las cargas por ACS [38]. En su conjunto, estas cargas definirán el calor necesario a ceder o retirar de un espacio para alcanzar las condiciones óptimas dadas por el confort térmico [38].

Las cargas por transmisión son la energía térmica transmitida por paredes, ventanas, suelo y techo por efecto de la diferencia de temperatura entre los ambientes internos y externos que separa el cerramiento [38]. Las cargas sensibles por transmisión están definidas por la Ecuación (4).

$$P_t = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

Donde P_t es la carga por transmisión [W], A es el área de superficie atravesada [m²], U es la transmitancia del cerramiento por el cual atraviesa la energía térmica [W·m⁻²·K⁻¹] y ΔT es la diferencia entre las temperaturas externas e internas del espacio a climatizar [K] [39].

Las cargas por ventilación son la energía térmica transmitida por la renovación de aire necesaria dentro del local para mantener las condiciones de aire necesarias para el uso de humano [38]. La carga por ventilación sensible y latente se define a través de las Ecuaciones (5) y (6) respectivamente.

$$P_{sv} = V_r \cdot \rho_{aire} \cdot C_{aire} \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$P_{lv} = V_r \cdot \rho_{aire} \cdot H_{agua} \cdot \Delta H \quad (6)$$

Donde P_{sv} y P_{lv} son las cargas por ventilación sensibles y latentes [W] respectivamente, ρ_{aire} es la densidad del aire [kg·m⁻³], C_{aire} es la capacidad calorífica del aire [J·kg⁻¹·K⁻¹], H_{agua} es el calor

de evaporación del agua [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$], V_r es la renovación de aire [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$], ΔT es la diferencia de temperaturas [K] entre el exterior e interior y ΔH es la diferencia de humedad absoluta entre el exterior e interior [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] [40].

Las cargas por infiltración transmiten energía térmica por efecto de infiltraciones de aire hacia el interior del local, son cargas semejantes a las cargas térmicas de ventilación en términos prácticos y de cálculo [38]. La carga por infiltración sensible y latente se define a través de las Ecuaciones (7) y (8) respectivamente.

$$P_{\text{sin}} = V_r \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot C_{\text{aire}} \cdot \Delta T \cdot \xi \quad (7)$$

$$P_{\text{lin}} = V_r \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot H_{\text{agua}} \cdot \Delta H \cdot \xi \quad (8)$$

Donde P_{sin} y P_{lin} son las cargas por infiltración sensibles y latentes [W] respectivamente, ρ_{aire} es la densidad del aire [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], C_{aire} es la capacidad calorífica del aire [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], H_{agua} es el calor de evaporación del agua [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$], V_r es la renovación de aire [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$], ΔT es la diferencia de temperatura entre el exterior e interior [K], ΔH es la diferencia de humedad absoluta entre el exterior e interior [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] y ξ es el coeficiente de infiltración [40].

Las cargas por radiación solar son la energía térmica transmitida por la radiación del sol y estas se dividen en cargas por radiación directa cuando la superficie en la que incide la luz solar es transparente o cargas por radiación indirecta cuando la superficie es opaca, las cuales dependen de distintos factores relacionados con la filtración y captación de la radiación solar [38]. Las ecuaciones (9) y (10) definen las cargas por radiación solar directas e indirectas respectivamente.

$$P_{\text{sd}} = R_m \cdot A \cdot S_i \cdot S_e \quad (9)$$

$$P_{\text{si}} = R_m \cdot A \cdot U \cdot \alpha' \cdot R_{\text{se}} \quad (10)$$

Donde P_{sd} es la carga por radiación directa [W], P_{si} es la carga por radiación indirecta [W], R_m es la radiación solar [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] promedio que incide en la superficie, S_e es el coeficiente de sombras externas, S_i es el coeficiente de sombras internas, α' es la absorptancia de la superficie y R_{se} es la resistencia térmica [$\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$] de la superficie exterior [41].

Las cargas internas son la energía térmica aportada por elementos presentes al interior del local como equipos eléctricos, equipos de iluminación y personas [38]. Las cargas internas están definidas según las Ecuaciones (11), (12), (13), (14) y (15).

$$P_{\text{se}} = p_e \cdot n \cdot C_u \quad (11)$$

$$P_{le} = p_e \cdot n \cdot C_u \quad (12)$$

$$P_{is} = p_e \cdot n \cdot C_u \quad (13)$$

$$P_{so} = N \cdot q_{sp} \cdot C_{si} \quad (14)$$

$$P_{lo} = N \cdot q_{lp} \cdot C_{si} \quad (15)$$

Donde P_{se} es la carga térmica sensible por equipos [W], P_{le} es la carga térmica latente por equipos [W], P_{is} es la carga sensible por iluminación [W], P_{so} es la carga sensible por ocupantes [W], P_{lo} es la carga latente por ocupantes [W], p_e es la potencia del equipo [W], n es el número de equipos, C_u es el coeficiente de utilización, N es el número de personas, q_{sp} es el calor sensible emitido por personas [W], q_{lp} es el calor latente emitido por personas [W] y C_{si} es el coeficiente de simultaneidad [39].

La carga por ACS es la carga térmica utilizada para el calentamiento de agua de uso sanitario requerida en el local [38], y se define con la Ecuación (16).

$$P_{ACS} = c_w \cdot \rho_w \cdot V \cdot t^{-1} \cdot \Delta T \quad (16)$$

Donde P_{ACS} es la carga por ACS [W], c_w es el calor específico del agua [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$], ρ_w es la densidad del agua [$kg \cdot m^{-3}$], V es el volumen de agua calentada [m^3], ΔT es la diferencia de temperatura entre el agua a calentar y la temperatura objetivo [K] y t es el tiempo de calentamiento del agua [s] [41].

4.1.3 Cargas térmicas críticas de climatización

La metodología para realizar el cálculo de demandas energéticas considera evaluar las cargas críticas para calefacción y refrigeración en las condiciones extremas de invierno y verano [30,42].

El objetivo del sistema de calefacción es elevar la temperatura en el interior de una estructura hasta alcanzar el confort térmico, y por lo tanto se realiza el cálculo de cargas térmicas considerando el caso crítico de frío extremo en invierno [39].

Por el contrario, en funcionamiento de refrigeración el sistema debe disminuir la temperatura en el interior de la estructura hasta alcanzar el confort térmico, por lo que se debe realizar el cálculo considerando el caso crítico de calor extremo en verano [39].

Para determinar la carga térmica en condiciones críticas de calefacción hay que considerar el caso más desfavorable de aportes térmicos del entorno. Se consideran las cargas por transmitancia, las cargas por ventilación e infiltración, las cargas por ACS para la temperatura crítica promedio de

invierno y las condiciones de humedad más desfavorables dadas en la zona [39]. La Ecuación (17) define la carga crítica para calefacción en invierno.

$$P_c = P_t + P_{sv} + P_{lv} + P_{sin} + P_{lin} + P_{ACS} \quad (17)$$

Donde P_c es la carga de calefacción crítica, P_t es la carga por transmisión [kW], P_{sv} y P_{lv} son las cargas por ventilación sensibles y latentes [kW] respectivamente, P_{sin} y P_{lin} son las cargas por infiltración sensibles y latentes [kW] respectivamente y P_{ACS} es la carga por ACS [kW].

Al igual que para el cálculo anterior, la carga crítica de refrigeración se debe calcular considerando el caso más desfavorable de verano, esto sería considerando la mayor cantidad de aportes térmicos del entorno. Se considera la temperatura crítica promedio de verano en la condición promedio de humedad, radiación solar promedio de verano y las actividades internas en el espacio. Las cargas correspondientes al cálculo de carga crítica de refrigeración serán las cargas por transmitancia, las cargas por ventilación e infiltración, las cargas internas y las cargas por efectos de la radiación solar [39]. La Ecuación (18) define la carga crítica para refrigeración en verano.

$$P_r = P_t + P_{sv} + P_{lv} + P_{sin} + P_{lin} + P_{se} + P_{le} + P_i + P_{so} + P_{lo} + P_{is} + P_{sd} \quad (18)$$

Donde P_r es la carga de refrigeración crítica, P_t es la carga por transmisión [kW], P_{sv} y P_{lv} son las cargas por ventilación sensibles y latentes [kW] respectivamente, P_{sin} y P_{lin} son las cargas por infiltración sensibles y latentes [kW] respectivamente, P_{sd} es la carga por radiación directa [kW], P_{si} es la carga por radiación indirecta [kW], P_{se} es la carga térmica sensible por equipos [kW], P_{le} es la carga térmica latente por equipos [kW], P_{is} es la carga sensible por iluminación [kW], P_{so} es la carga sensible por ocupantes [kW] y P_{lo} es la carga latente por ocupantes [kW].

A partir del cálculo de las cargas críticas se debe seleccionar la BCG que cumpla con el requerimiento de potencia térmica crítica demandada por el sistema de climatización [25].

4.1.4 Gráfico de cargas térmicas en función de la temperatura ambiente

Los gráficos de cargas térmicas en función de la temperatura permiten determinar la carga térmica demandada por el sistema de climatización según la temperatura ambiente exterior del edificio, facilitando los cálculos de cargas térmicas en función del tiempo [25].

El gráfico se construye asumiendo una relación lineal de las cargas térmicas con respecto a la temperatura ambiente. Las cargas térmicas críticas y las condiciones de confort térmico definen en cada caso los dos puntos de intersección de las rectas describen la carga térmica con los ejes coordenados para obtener así las ecuaciones de ambas rectas [25].

La Figura 3 presenta un ejemplo de grafico de cargas térmicas en función de la temperatura ambiente exterior, donde la línea azul y la línea roja demarcan las funciones de calefacción y refrigeración respectivamente, con una temperatura objetivo de calefacción de 20 °C y de refrigeración de 23 °C.

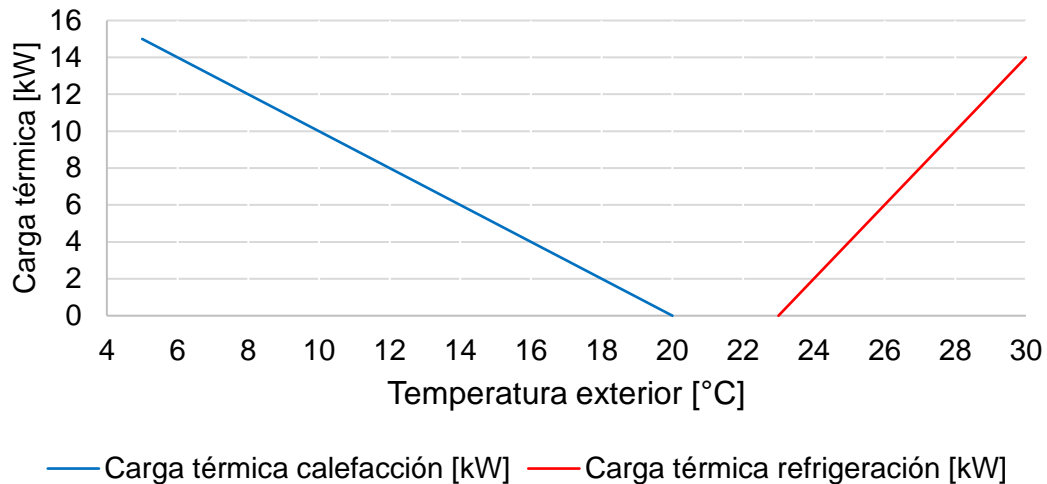


Figura 3: Ejemplo de grafico carga térmica en función de la temperatura para calefacción y refrigeración.

4.1.5 Demanda energética anual

Definidas las cargas térmicas en función de la temperatura ambiente se puede calcular la demanda energética anual de climatización para el edificio, en función del tiempo de uso de la infraestructura y conociendo los valores horarios de temperatura ambiental de la zona [25].

La cantidad de energía demandada durante un periodo de tiempo dado está restringida al uso real del sistema de climatización lo que hace importante conocer los horarios y periodos de uso de la estructura para así realizar una estimación más real de la energía requerida por el sistema de climatización [25].

La demanda energética de climatización anual será finalmente, la cantidad de energía térmica requerida por el usuario para los mantener las condiciones de confort térmico en los horarios de uso del edificio, siendo útil para definir costos asociados al uso del sistema de climatización [25].

4.2 DETERMINACIÓN DE ENERGÍA DISPONIBLE EN EL TERRENO

La determinación de la energía disponible en el terreno es otro de los puntos importantes en el dimensionamiento de un sistema de climatización con BCG y determinará la sostenibilidad y la viabilidad de la explotación [42].

La energía térmica disponible en un terreno determinado viene dada por sus características térmicas e hidrogeológicas. Estas características definen el tipo de captación más adecuada, energía disponible en el tiempo y los efectos en el medio generados por la extracción [5].

4.2.1 Factores a considerar según tipo de captación

Los parámetros característicos más importantes del terreno dependen del tipo de captación geotérmica [20]. Para que una captación en sistema abierto sea viable deben darse unas características hidrogeológicas adecuadas. En el caso de que las características hidrogeológicas no sean adecuadas para una captación abierta es preferible la realización de una captación geotérmica cerrada y toman mayor relevancia las propiedades térmicas de los materiales geológicos [20].

Dada las diferencias que existen en la operación de las captaciones de los sistemas abiertos y cerrados, se hace necesaria una revisión de las propiedades térmicas e hidrogeológicas del terreno más importantes [20].

4.2.1.1 Propiedades térmicas del terreno

Las propiedades térmicas del terreno más importantes para definir un sistema de captación geotérmica son la conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica [20].

La conductividad térmica [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] expresa la capacidad de transmitir calor por conducción que tiene un material [9,22].

La capacidad térmica volumétrica [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] expresa la cantidad de calor que es capaz de almacenar por unidad de volumen de material [9,22].

La difusividad térmica [$m^2 \cdot s^{-1}$] es un parámetro derivado que relaciona la conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica y representa la velocidad en que se difunde el calor en un material determinado [43].

4.2.1.2 Propiedades hidrogeológicas

La presencia de formaciones geológicas clasificadas como acuíferos en donde los poros de las rocas contiene agua con capacidad de moverse, modifica de manera importante las propiedades térmicas macroscópicas del terreno y hace relevante la consideración de sus propiedades hidrogeológicas en la determinación del potencial geotérmico aprovechable [9,22].

Las características hidrogeológicas a considerar en una captación geotérmica de muy baja entalpía son la conductividad hidráulica, la porosidad eficaz, el coeficiente de almacenamiento, el tipo de acuífero al que se desea acceder y su potencia [22,51].

La conductividad hidráulica [$m \cdot d^{-1}$] es una propiedad del acuífero que describe su capacidad para transmitir el agua subterránea [20]. La transmisividad define la capacidad del acuífero para ser explotado y es el resultado de la multiplicación de la conductividad hidráulica por el espesor saturado del acuífero [20].

La porosidad mide el volumen relativo de los poros en una formación geológica en relación con el volumen total de esta. La porosidad eficaz en cambio, describe la relación de poros interconectados que son capaces de permitir fluir agua [44].

El coeficiente de almacenamiento es adimensional y se define como el volumen de agua que es liberado por un acuífero cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico y dependerá del tipo de acuífero [44].

Los tipos de acuíferos son clasificados según las condiciones hidrostáticas a las que está sometida el agua contenida en ellos. Estos pueden ser acuíferos libres, confinados o semi confinados [44].

El ensayo de bombeo es un método de evaluación de las capacidades propiedades hidrogeológicas de un acuífero que consiste en el bombeo constante de agua desde un pozo de captación y en el cual se mide la evolución del abatimiento generada por la extracción de agua en función del tiempo [45]. Estos ensayos permiten determinar la conductividad hidráulica, transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, así como la existencia de barreras o bordes impermeables cercanas y zonas de recarga [45], siendo útiles para definir la idoneidad de los sistemas de captación abiertos [20].

4.2.2 Potencia térmica demandada al terreno

La definición de la potencia térmica demandada al terreno en un sistema de muy baja temperatura es dada por la demanda térmica del usuario y el rendimiento de la BCG [46]. Este valor de potencia térmica es el requerimiento de energía que debe ser extraída del terreno mediante el sistema de captación para alimentar a la BCG [5].

Las Ecuaciones (19) y (20) permiten obtener P_{gc} y P_{gr} , que son la potencia térmica exigida al terreno para fines de calefacción y refrigeración respectivamente.

$$P_{gc} = P_c \frac{COP - 1}{COP} \quad (19)$$

$$P_{gr} = P_r \frac{EER + 1}{EER} \quad (20)$$

Donde COP y EER son los coeficientes de rendimiento de calefacción y refrigeración, P_c y P_r son las potencias de calefacción y refrigeración requeridos por la estructura respectivamente [46].

4.3 MODELACIÓN DE CAPTACIONES GEOTÉRMICAS

Este trabajo hace foco en una captación geotermia con recirculación y por tanto los siguientes apartados se enfocaran a los estudios y cálculos relativos a este tipo de captación.

El objetivo de la modelación de una captación geotérmica en sistema abierto es evaluar el los efectos hídricos y térmicos de la explotación geotérmica del terreno, para definir una configuración de captación que sea sostenible [20].

Los modelos como herramienta de estudio permiten plantear un problema conceptual en términos cuantitativos que pueden ser resueltos mediante métodos analíticos o métodos de simulación numérica [20].

Para la modelación de una captación en sistema abierto se requiere describir la geología e hidrogeología del lugar en el cual se instalará, y evaluar si el terreno es capaz de sostener la demanda hídrica y térmica requerida por la BCG para mantener las condiciones de confort en el edificio [20].

Dado que la modelación de captaciones es una aproximación teórica, el diseño de la captación obtenido debe ser considerado como un diseño preliminar, que debiese ser comprobado mediante ensayos in-situ para asegurar un correcto dimensionamiento del diseño final de captación [20].

4.3.1 Parámetros de funcionamiento

Los parámetros de funcionamiento en un sistema abierto con recirculación son el caudal de captación y la temperatura de reinyección del recurso hídrico al acuífero. Estos valores pueden ser estimados mediante la metodología expuesta a continuación.

Así mismo, estos valores son sólo referenciales debido a que en la realidad estarán sujetos a las capacidades de la BCG seleccionada para realizar la instalación.

4.3.1.1 Caudal extracción mínimo para BCG

El caudal de captación de agua es la variable más importantes en un sistema de captación abierto, donde el acuífero en el cual se instala la captación hidráulica debe tener la capacidad de sostener el caudal requerido para suplir a la BCG [20].

El caudal de extracción mínimo corresponde al caudal necesario para suplir de energía geotérmica suficiente para satisfacer la demanda térmica del usuario en un periodo de calefacción

determinado. Este está definido por la demanda térmica de la BCG y puede ser determinado con la Ecuación (21).

$$Q_p = \frac{P_c \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{COP}\right)\right)}{\Delta T \cdot C_{vw}} \quad (21)$$

Donde P_c es la carga térmica [W] de calefacción demandada por el usuario, ΔT es la diferencia de temperatura [K] entre el agua captada y reinyectada, C_{vw} es la capacidad calorífica volumétrica [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] del agua, COP es el coeficiente de rendimiento para calefacción y Q_p es el caudal de extracción [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] mínimo para alimentar a la BCG [20].

Para conocer el valor del caudal mínimo se necesita conocer la carga térmica crítica de calefacción o refrigeración dependiendo de las necesidades del edificio, la diferencia de temperatura que experimenta el caudal que alimenta a la BCG desde el terreno y el COP de la BCG [20].

4.3.1.2 Temperatura de reinyección de agua al acuífero

La variación de temperatura generada en el agua captada del terreno por el intercambio de calor con la BCG, debe ser estimada para conocer el valor de temperatura de reinyección del agua y predecir los efectos térmicos que su reinyección puede generar en el medio subterráneo.

Para calcular esta variación de temperatura del agua se utiliza la Ecuación (22)

$$T_r = T_c - \frac{P_c}{C_{vw} \cdot Q_p} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \quad (22)$$

Donde T_r es temperatura [K] de reinyección, T_c es temperatura [K] de captación, P_c es la carga térmica [W] de calefacción demandada por el usuario, C_{vw} es la capacidad calorífica volumétrica [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] del agua, COP es el coeficiente de rendimiento para calefacción y Q_p es el caudal de producción mínimo [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] [20].

4.3.2 Método analítico para la evaluación de un sistema de captación abierto con recirculación mediante dos pozos

Las ecuaciones del método analítico propuesto en los apartados siguientes son válidas para acuíferos libres, y permiten determinar la profundidad mínima de los pozos de la captación, así como la distancia óptima entre el pozo de captación y reinyección para una explotación geotérmica sostenible [20].

4.3.2.1 Abatimiento generado en un pozo de captación

El abatimiento es el descenso de potencial hidráulico generado en el acuífero por el bombeo de un volumen de agua en el pozo de captación y se manifiesta como un cono de descensos alrededor del pozo donde se realiza el bombeo. El descenso de potencial hidráulico tiene su valor máximo en el punto donde ocurre la extracción y disminuye al alejarse del centro de la captación [44].

La distribución espacial del abatimiento generado y su magnitud dependerá principalmente de las propiedades hidrogeológicas del acuífero y del caudal de captación bombeado [44].

Para evaluar el abatimiento máximo de un pozo en función del tiempo se usa la Ecuación (23).

$$s_w = \frac{2,30Q}{4\pi T^w} \log_{10} \left(\frac{2,25T^w t}{r_p^2 S} \right) \quad (23)$$

Donde s_w es el abatimiento [m], Q es el caudal extraído [$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$], T^w es la transmisividad [$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$], r_p es el diámetro [m] del pozo, t es el tiempo [d] y S es el coeficiente de almacenamiento [m^{-1}] [20].

Para pozos de captación destinados a usos geotérmicos se recomienda hacer una evaluación de abatimiento para el caudal máximo en el periodo de uso de invierno (150 días), evaluando si el abatimiento asociado es sostenido por la profundidad del pozo [20].

Un pozo de reinyección de aguas genera lo contrario del abatimiento, es decir, un ascenso del nivel piezométrico alrededor del pozo [20]. En el caso de un sistema abierto con recirculación el ascenso generado por el pozo de reinyección puede tener efectos parciales de cancelación sobre el abatimiento generado en el pozo de captación resultando en un menor abatimiento alrededor del pozo de captación [20].

4.3.2.2 Distancia de no interferencia por flujo de agua entre dos pozos

Para una captación geotérmica abierta con reinyección de agua existe el riesgo de generar una interferencia hidráulica entre los pozos de captación y reinyección si estos se encuentran a una distancia que permita la interacción [47].

La distancia mínima de separación entre pozos para que no se produzca interferencia puede ser evaluada mediante el factor β con la Ecuación (24), considerando que el pozo de inyección se instala aguas abajo del de captación [20].

$$\beta \leq 1; \text{ para } \beta = \frac{2Q}{T^w \pi i L} \quad (24)$$

Donde Q es el caudal extraído en $[\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}]$, T^w es la transmisividad en $[\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}]$, i es el gradiente hidráulico entre los pozos y L la longitud $[\text{m}]$ de separación entre los pozos [20].

Para determinar la distancia L $[\text{m}]$ que cumpla con la condición de no interferencia por flujo de agua entre el pozo de extracción y el de inyección [48], el factor β debe ser menor o igual a 1 [20].

4.3.2.3 Tiempo de interferencia térmica entre dos pozos

La interferencia térmica ocurre cuando una porción del flujo de agua del pozo de inyección (fría), es absorbida en el pozo de captación (caliente) generando la variación de temperatura en el agua extraída [20].

El tiempo de interferencia térmica es dado por el momento en el cual existe una interacción hidráulica por el camino más corto entre los pozos y este es calculado con la Ecuación (25) [20].

$$t_{int} = \frac{C_{vs}}{C_{vw} K i} \left[\frac{\beta}{\sqrt{\beta - 1}} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{\beta - 1}} \right) - 1 \right] \quad (25)$$

Donde t_{int} es el tiempo de interferencia térmica $[\text{d}]$, C_{vs} y C_{vw} son la capacidad térmica volumétrica $[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$ de la fase sólida y líquida del acuífero respectivamente, i es el gradiente hidráulico entre los pozos, β es el factor definido por la Ecuación (24) y K es la conductividad hidráulica del acuífero $[\text{m} \cdot \text{d}^{-1}]$ [20].

4.3.2.4 Variación de temperatura en pozo de captación por interferencia térmica

La interferencia térmica generada por el flujo de agua entre los pozos produce una variación de temperatura en el agua del pozo de captación que podría tener efectos sobre el rendimiento del sistema de climatización si esta variación de temperatura es considerable [20].

La variación de temperatura en el pozo de producción se produce en función del tiempo de interferencia térmica entre los pozos y puede ser estimada con la Ecuación (26) [48].

$$\frac{T_{pro} - T_{iny}}{T_0 - T_{iny}} = 0,34 \exp\left(-0,0023 \frac{t}{t_{int}}\right) + 0,34 \exp\left(-0,109 \frac{t}{t_{int}}\right) + 1,37 \exp\left(-1,33 \frac{t}{t_{int}}\right) \quad (26)$$

Donde T_{pro} es la temperatura $[\text{K}]$ en el pozo de captación una vez producida la interferencia térmica, T_{iny} es la temperatura $[\text{K}]$ del agua inyectada, T_0 es la temperatura $[\text{K}]$ del agua en el pozo de captación antes de producirse la interferencia térmica, t es el tiempo $[\text{d}]$ en el cual se quiere evaluar la variación de temperatura en el pozo de producción y t_{int} el tiempo de interferencia térmica $[\text{d}]$ obtenido con la Ecuación (25) [20].

4.3.3 Modelo numérico de simulación para evaluar un sistema de captación

Además del método analítico, las captaciones abiertas también pueden ser evaluadas mediante métodos de simulación numérica que permiten estudiar problemas complejos, con múltiples pozos de inyección y producción, cargas térmicas y temperaturas de reinyección de aguas variables [20].

La herramienta de simulación utilizada en el caso de estudio será el software FEFLOW de la compañía DHI. Este programa está basado en el método de elementos finitos para hacer simulaciones de flujo de agua y transporte de calor en medios porosos. FEFLOW permite resolver problemas en dos y tres dimensiones, con o sin densidad variable de fluidos, en medios saturados y no saturados, en régimen estacionario y transitorios [21].

El método de elementos finitos se puede aplicar a ecuaciones en derivadas parciales lineales y no lineales [49] y requiere la discretización del dominio del problema dividiendo un dominio espacial continuo en elementos discretos [49]. Los elementos se definen usando un número finito de nodos, en los cuales se calculan las variables principales de las ecuaciones que son la temperatura y el nivel piezométrico [49].

El flujo de agua y transporte de calor es difusivo mediante los balances de flujo, masa y energía térmica para el acuífero y el agua subterránea [46].

La ecuación de conservación de masa para fluidos en medio poroso es descrita por la Ecuación (27) [50].

$$S \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla Q_d = Q + Q_{EOB} \quad (27)$$

Donde S es el almacenamiento específico [m^{-1}], h es el nivel piezométrico [m], Q es la entrada o salida de flujo [$m^3 \cdot s^{-1}$], Q_d es el flujo de Darcy [$m \cdot d^{-1}$] y Q_{EOB} refiere a la aproximación de Oberbeck-Boussinesq Extendida [46].

El flujo de Darcy es dado por la ecuación (28) [50].

$$Q_d = -K \cdot \nabla h \quad (28)$$

Donde Q_d es el flujo de Darcy [$m \cdot d^{-1}$], K es la conductividad hidráulica [$m \cdot d^{-1}$], ∇h es la variación de nivel piezométrico [m].

La ecuación de transporte de calor convectivo y advectivo en un medio poroso es descrita por la Ecuación (29) [46].

$$C_{va} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_a \cdot \nabla T - C_{vw} \cdot Q_d \cdot T) + H \quad (29)$$

Donde C_{va} y C_{vw} son las capacidades térmicas volumétricas del acuífero saturado y el agua respectivamente [$W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$], Q_d es el flujo de Darcy [$m \cdot d^{-1}$], λ_a es la conductividad térmica del acuífero saturado [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], T es la temperatura [K] y H es una fuente o sumidero de calor [$W \cdot m^{-3}$] en el medio.

El modelamiento numérico con FEFLOW de una captación geotérmica en sistema abierto requiere definir los parámetros y variables que describen las condiciones hidrogeológicas y térmicas del terreno, así también como las variables de funcionamiento del sistema geotérmico [51].

El software FEFLOW resuelve el problema de transporte de calor sobre el problema de flujo hidrogeológico, por lo que la correcta definición de este es un requisito para el modelamiento numérico [20].

La metodología de construcción y ejecución del modelo numérico debe ser la siguiente [51]:

Se comienza por la definición del modelo conceptual que entregará las condiciones, el tipo de problema físico y el establecimiento de las ecuaciones para resolver el problema [51].

Se continúa definiendo el dominio espacial del modelo que contendrá el problema [51] para luego proceder a definir las condiciones de borde del dominio y las propiedades de los materiales sólidos y fluidos implicados [51].

Definidas las condiciones de borde y propiedades de los materiales el modelo se encontrará terminado y listo para iniciar la ejecución de este, donde el software realizará el cálculo numérico bajo las condiciones propuestas anteriormente [51].

El último paso corresponde a la verificación de resultados, donde se evalúan los resultados obtenidos y se verifica el comportamiento del modelo comparándolo con datos medidos en campo [52].

4.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN

Una vez completado el diseño del sistema de captación y distribución de calor, se debe realizar la evaluación económica del proyecto para determinar el sistema de climatización por geotermia es viable económicamente [34].

Los costos asociados a una instalación geotérmica pueden ser agrupados en costos de capital y costos operacionales [34]. En conjunto, estos dos costos permitirán realizar la evaluación

económica tanto del sistema geotérmico como el del sistema convencional permitiendo hacer la comparativa de costos asociados en un periodo determinado [9].

La evaluación de la viabilidad económica se realizará con el método del Valor Actual Neto (VAN) que se calcula mediante la Ecuación (30), considerando la tasa de interés correspondiente al proyecto y un periodo de tiempo en años [9].

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + k_d)^t} \quad (30)$$

Donde I_0 es el costo de la inversión, n el número de periodos de tiempo a evaluar, F_t es el flujo costos en cada periodo y k_d es la tasa de descuento [9].

La tasa de interés asociada al cálculo del VAN es a su vez dependiente de factores externos al proyecto mismo como son la inflación o la tasa de crédito ligada a préstamos para solventar la inversión del proyecto [9].

Los costos inversión corresponden a aquellos gastos de inversión para el desarrollo y preparación de proyecto, por lo que son asumidos en el año 0 de la evaluación económica [34].

Para un proyecto de climatización por geotermia, los costes capitales de mayor relevancia son la adquisición de equipos e instalación de la BCG, el sistema de distribución y la perforación e instalación del sistema de captación [53].

Los costos operacionales corresponden a aquellos que son necesarios para que el sistema opere adecuadamente, y son dados a lo largo de la operación del sistema de climatización y generación de ACS [34].

Para un proyecto de climatización por geotermia los costes operacionales considerados son el gasto energético asociado al uso del sistema y el mantenimiento preventivo del sistema [53].

En un sistema geotérmico los costos de inversión son altos pero los de operación son bajos, permitiendo generar ahorros a largo plazo en comparación a otras fuentes de climatización [9].

5. CASO DE ESTUDIO

En este proyecto se estudia la viabilidad de realizar una captación geotérmica de muy baja entalpía en sistema abierto para la climatización de una Sala Cuna y Jardín Infantil (SCJI) ubicado en una parcela de 40 m x 20 m de la comuna de Talcahuano, Región del Biobío, Chile. Ver Anexo C.1. Ubicación del edificio SCJI para visualizar el lugar del emplazamiento.

En este capítulo se presentarán los datos utilizados para el cálculo de demanda energética anual, diseño del sistema de captación abierto y el análisis de viabilidad económica del sistema de climatización propuesto.

5.1 CONDICIONES DE USO DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

Los horarios de uso del edificio SCJI destinado a educación parvularia es definido por el Departamento de Educación del Ministerio de Educación de Chile [54]. La Tabla 1 resume los días y los considerados como guía para establecer los periodos de necesidad de climatización y ACS de la instalación proyectada.

Tabla 1: Días y horarios de funcionamiento de establecimientos educacionales de nivel parvulario para el año 2018 [54].

Mes	Días de uso [d]	Horario de clases [h]
Marzo	19	8:00 a 16:00
Abril	21	8:00 a 16:00
Mayo	22	8:00 a 16:00
Junio	21	8:00 a 16:00
Julio	11	8:00 a 16:00
Agosto	22	8:00 a 16:00
Septiembre	17	8:00 a 16:00
Octubre	22	8:00 a 16:00
Noviembre	20	8:00 a 16:00
Diciembre	5	8:00 a 16:00

Se propone definir el uso del sistema de climatización de 7:00 a 16:00, dado que el edificio debe abrir sus puertas a las 7:00 AM para el ingreso de estudiantes y ya que la geotermia es un tipo de climatización pasiva donde se necesita tiempo para llegar a las condiciones de confort.

Con los datos presentados en la Tabla 1, se infiere que el uso del edificio en periodos que requieran refrigeración (verano) es mínimo. Por otra parte, Talcahuano pertenece a la zona climática E de Chile donde la demanda energética para refrigeración representa sólo el 4,3% de la demanda total de climatización anual en términos de costos energéticos [32]. Así, la refrigeración del edificio no será incluida en el proyecto.

5.2 CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO

Las características del edificio que se describen a continuación son los elementos estructurales que están ligados al cálculo de cargas térmicas. También se describe el sistema climatización convencional instalado en el edificio.

5.2.1 Elementos estructurales

Dentro de los elementos estructurales que afectan el cálculo de las cargas térmicas se encuentran las superficies y transmitancia de cerramientos (ventanas, muros, suelo y techos) que afectan al cálculo de cargas térmicas por transmitancia. La superficie de cada cerramiento y sus valores de transmitancia de cerramientos del edificio se resumen en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2: Superficie de cerramientos de salas a climatizar [55].

Sala	Planta	Superficie pared [m ²]	Superficie techo [m ²]	Superficie suelo [m ²]	Superficie ventana [m ²]
1	1	38,07	-	24,75	16,80
2	1	40,23	-	55,08	16,80
3	1	14,04	-	11,44	3,85
4	1	24,84	-	29,90	8,40
5	1	16,74	-	9,60	2,60
6	1	15,80	8,54	8,54	2,60
7	1	7,29	13,50	13,50	4,00
8	2	32,13	20,62	-	9,90
9	2	38,63	58,41	-	12,80
10	2	18,00	12,47	-	3,00
11	2	23,00	23,92	-	12,80
12	2	19,50	14,57	-	5,20
13	2	6,00	3,60	3,60	1,10

Tabla 3: Transmitancia térmica para cerramientos de SCJI [55].

Cerramiento	Transmitancia [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Pared	0,66
Techo	0,31
Suelo	0,56
Ventana	2,79

5.2.2 Sistema de climatización convencional y ventilación

El edificio SCJI está dotado actualmente con un sistema de calefacción central con caldera mixta, que a través de radiadores convencionales suministra calor a las distintas salas del edificio y produce ACS [56].

Este sistema fue diseñado basado en el cálculo de cargas críticas para el periodo de invierno, resultando en una carga térmica de calefacción de 15,2 kW, sin considerar cargas por agua caliente sanitaria (ACS) [56].

El sistema de calefacción está compuesto por una caldera y un sistema de distribución compuesto por radiadores convencionales [56]. Paralelamente, la caldera está encargada también de suministrar al edificio de agua caliente sanitaria por medio de una red hidráulica independiente del sistema de calefacción [56].

La caldera convencional es el modelo ECO 25/28 que tiene una potencia nominal de 29 kW, una potencia eléctrica nominal de 150 W y una eficiencia de 97% para la producción de calor con gas licuado.

La capacidad del sistema de distribución es de aproximadamente 16,62 kW de potencia [65,66], donde los radiadores son instalados de tal forma de suministrar la potencia térmica demandada por cada sala a calefaccionar y el fluido es desplazado por dos bombas recirculadoras de 102 W de potencia. Ver Anexo C.2. Radiadores convencionales caso de estudio para más información.

Además de calefacción, las salas del edificio consideran ventilación con una renovación de aire igual al volumen de cada sala por hora de uso, exceptuando las salas de hábitos higiénicos que necesitan 6 veces su volumen por hora para mantener el aire en óptimas condiciones [55].

5.3 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Las condiciones climáticas que presenta la ciudad Talcahuano, son cruciales para definir la demanda energética de climatización asociado al edificio. Ver Anexo C.3. Demandas térmicas por zona climática de Chile para conocer demandas térmicas por zona bajo los estándares de aislación vigentes en la norma “RT 2007” [32].

Los factores ambientales considerados en el cálculo de cargas térmicas son, la temperatura y humedad crítica de invierno y verano, la temperatura ambiente anual, la temperatura del suelo y la radiación solar. Estos factores se usarán para el cálculo de cargas térmicas críticas, exceptuando la temperatura ambiente anual que será utilizada para definir la demanda térmica anual.

5.3.1 Temperatura crítica

Las temperaturas críticas de invierno fue extraída de la base de datos de “climate-data.org” para Talcahuano [58] y tiene un valor de 5,8 °C, que será utilizada en el cálculo de cargas térmicas

por transmitancia, ventilación e infiltración de invierno. Ver anexo C.4. Temperaturas promedio en Talcahuano para más información.

5.3.2 Humedad crítica

La humedad crítica de invierno fue extraída desde la base de datos “ASHRAE Climatic Design Conditions 2009/2013/2017” [59], y considera un valor de humedad relativa igual a 99,6 % para Talcahuano.

El valor de humedad crítica es usada en el cálculo de cargas por ventilación e infiltración, y debido a que las ecuaciones que describen estas cargas requieren valores de humedad absoluta se utilizará un diagrama psicrométrico a 101325 Pa de presión para convertir las unidades de humedad relativa a humedad absoluta.

El valor resultante de humedad absoluta crítica para invierno es de 15,2 g·kg⁻¹. Ver anexo C.5. Carta psicrométrica para conocer valores ingresados y resultantes expuestos.

5.3.3 Temperatura ambiente y temperatura suelo

Los datos de temperatura del aire por hora anual y temperatura promedio mensual del suelo a 10 cm de profundidad son extraídos desde la base de datos del INIA [60] para el año 2018.

La temperatura del aire será de utilidad para definir la demanda térmica anual a través del gráfico de cargas térmicas en función de la temperatura. La temperatura promedio mensual del suelo a 10 cm de profundidad facilitara el cálculo de cargas por ACS. Ver Anexo C.6. Temperatura anual Talcahuano y Anexo C.7. Temperatura promedio del suelo para más información.

La temperatura promedio mensual es extraída de la base de datos de “climate-data.org” y será utilizada en el modelamiento numérico. En el Anexo C.4. Temperaturas promedio en Talcahuano se presentan los valores de temperatura promedio ambiental, con las cuales también es posible calcular el promedio de temperatura anual de Talcahuano, que corresponde a 13,1 °C.

5.4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y TERMOGEOLOGÍA

La ciudad de Talcahuano está situada en la zona costera del Chile sobre depósitos litorales, sedimentarios de arena y gravas. Donde se puede encontrar secuencias de sedimentos marinos de plataforma, litorales o transicionales en la escala temporal geológica del Pleistoceno-Holoceno [61].

En el sector del emplazamiento del edificio se tiene una elevación de 8 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y en su estratificación se encuentra presencias de detrítico de grano medio y fino

(85% y 15% respectivamente) hasta una profundidad de 5,5 m.s.n.m., seguido por arenas negras de grano medio hasta los -100 m.s.n.m. de profundidad que es donde se encuentra el basamento metamórfico compuesto por filita-esquisto no permeable [72,73]. Ver anexo C.8. Caracterización geológica en el acuífero de Talcahuano y Anexo C.9. Profundidad de basamento para más información.

Definidos los materiales geológicos en la zona de emplazamiento se procede a determinar a partir de datos bibliográficos los valores de la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica media para los materiales presentes en la zona de estudio [25], donde se considerarán los estratos superiores compuestos principalmente por arenas de grano medio como una sola unidad geológica.

Así la conductividad térmica de arenas de grano medio, arcilla/limo, filita-esquisto y agua son de $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $2,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ y $0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ respectivamente. Para la capacidad calorífica volumétrica de arenas de grano medio, arcilla/limo, filita-esquisto y agua se tienen valores de $1,45 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$, $1,55 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$, $2,35 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ y $4,18 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ respectivamente. Ver Anexos C.10. Valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica para más información.

5.4.1 Caracterización hidrogeológica

La zona de emplazamiento se encuentra sobre el ambiente hidrogeológico denominado acuífero de Talcahuano que ha sido estudiado previamente mediante campañas de sondeos eléctricos verticales y aforos de aguas en la comuna [63].

El espesor del acuífero libre es de aproximadamente 108 metros y presenta un nivel piezométrico aproximado en el lugar del emplazamiento del edificio de 7 m.s.n.m. [72,73].

El acuífero de Talcahuano ha sido clasificado como un acuífero superficial no confinado [63] compuesto por arenas de grano medio con una porosidad total de 0,35, una porosidad eficaz de 0,25 y un coeficiente de almacenamiento de 0,25 [m^{-1}] [64] (Véase Anexo C.12. Porosidad para conocer porosidad de materiales).

Presenta una conductividad hidráulica estimada de 2 m/s en el plano horizontal y 0,1 m/s en el plano vertical (Ver Anexo C.13. Permeabilidades del acuífero de Talcahuano), y un gradiente hidráulico estimado de aproximadamente 0,005 con un flujo de aguas hacia el oeste [63].

6. CALCULO DE DEMANDA ENERGÉTICA

En este capítulo se describen los cálculos de cargas térmicas para las condiciones críticas de invierno, se confecciona el gráfico de cargas térmicas en función de la temperatura ambiente y se calcula la demanda energética anual del sistema de climatización del edificio SCJI.

6.1 CARGAS TÉRMICAS DE CALEFACCIÓN

A continuación se presenta el cálculo de cargas térmicas críticas para calefacción en el edificio del caso de estudio.

6.1.1 Cargas por transmisión

La carga crítica de invierno es de 7,36 kW en el edificio. La Tabla 4 presenta el resumen del cálculo realizado según la Ecuación (5).

Tabla 4: Parámetros de entrada y resultados para cargas por transmisión en invierno.

Cerramientos	Área [m ²]	Transmitancia [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	ΔT Calefacción [°K]	Carga Calefacción [kW]
Paredes	194,40	0,66	14,20	1,83
Ventanas	99,85	2,79	14,20	3,95
Cielo	155,63	0,31	14,20	0,69
Suelo	156,41	0,56	10,10	0,88
Total [kW]	7,36			

6.1.2 Cargas por ventilación e infiltración

La carga térmica crítica de calefacción por ventilación e infiltración es de 7,11 kW.

La Tabla 5 muestra el resumen del cálculo correspondiente a las cargas térmicas por ventilación e infiltración según las Ecuaciones (6), (7), (8) y (9). Para los cálculos se consideró que la densidad del aire es de 1,29 kg·m⁻³, la capacidad calorífica del aire es 1012 J·kg⁻¹·K⁻¹ y el calor de evaporación del agua tiene un valor de 2257 J·kg⁻¹ a 1 bar de presión [40]. Ver Anexo D.1. Cargas por ventilación e infiltración para conocer dimensiones de espacios a climatizar.

Tabla 5: Resultado de cálculo para cargas de ventilación e infiltración en invierno.

VARIABLES	Volumen a calefaccionar	Factor de infiltración	ΔH [g/kg]	ΔT [°C]	Carga sensible [kW]	Carga latente [kW]	Carga Total [kW]
Ventilación	1057	1	0,0016	14,2	5,44	1,33	7,11
Infiltración	1057	0,05	0,0016	14,2	0,27	0,07	

6.2 CARGAS POR AGUA CALIENTE SANITARIA

Para el edificio SCJI se considera el cuidado de 60 niños, los cuales exigen una demanda máxima diaria de 5,7 litros de ACS por persona, una demanda promedio diaria de 1,7 litros de ACS por persona y una demanda máxima por hora de 1,7 litros de ACS por persona [37]. Ver Anexo D.2. ACS para más información.

Las cargas térmicas por ACS dependen principalmente del salto de temperatura del agua a calentar. Para ello se realiza el cálculo considerando que la temperatura promedio anual del suelo de 15,7 °C se aproxima al valor de la temperatura del agua que entra al sistema de calentamiento de ACS, y que esta alcanzará una temperatura de 55 °C por la capacidad de la BCG.

A continuación se presenta la Tabla 6 con los datos de entrada para el cálculo de la cargas por ACS según la Ecuación (16).

Tabla 6: Parámetros de entrada para cálculo de cargas por ACS [65].

Calor específico del agua [$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	1
Densidad del agua [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1000
Volumen de agua a calentar [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$]	0,102
Tiempo de calentado de agua [h]	1
T. objetivo [°C]	55

El cálculo de la carga crítica por ACS resulta de 5,39 kW para mes de julio. Para esta carga térmica el sistema es capaz de entregar 102 litros de ACS por hora, cumpliendo con la demanda máxima por hora para la cantidad de alumnos (102 litros) y la demanda máxima diaria del edificio [37]. Ver Anexo D.2. ACS para encontrar Tabla 15, en la cual se resumen las cargas térmicas mensuales calculadas para ACS en el año 2018.

6.3 CARGA TÉRMICA CRÍTICA DE CALEFACCIÓN

Las cargas térmicas críticas de calefacción calculada con la ecuación (17) para las condiciones extremas de invierno, resulta en una carga crítica de 14,47 kW sin considerar las cargas por ACS.

A pesar de no ser considerada en el cálculo de cargas térmicas críticas, la carga por ACS debe ser considerada en la elección de la BCG. De esta forma, la BCG debe ser capaz de suministrar la carga crítica de invierno que viene dada por las cargas de calefacción crítica en adición a la carga por ACS crítica de invierno resultando en un total de 19,88 kW de potencia térmica.

6.4 CARGA TÉRMICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

El Gráfico 5 presenta la función que describe la carga térmica en función de la temperatura exterior al edificio que es construida mediante el método de cargas críticas para calefacción. Esta ecuación facilitará el cálculo de cargas térmicas mensuales y anuales para el caso de estudio.

El grafico de cargas térmicas en función de la temperatura para calefacción (Figura 4) se construye con la temperatura critica de invierno (5,9 °C) y la carga critica asociada (14,47 kW) como primer punto coordinado de la ecuación, así el segundo punto corresponde a la temperatura objetivo de verano (20 °C) en la que se necesita una carga térmica igual a 0 kW debido a ser la condición de confort.

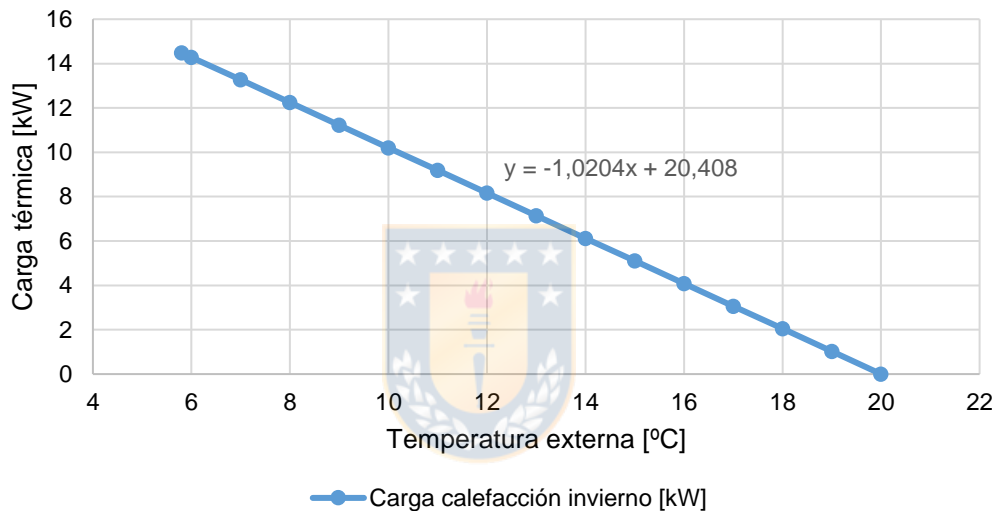


Figura 4. Grafico de demanda térmica de calefacción en función temperatura exterior para mantener las condiciones de confort interior de invierno.

Es importante aclarar que en este gráfico no es considerada la carga por ACS debido a que esta no depende directamente de la temperatura ambiente exterior, por lo que debe agregarse en paralelo a este cálculo.

6.5 DEMANDA TÉRMICA ANUAL DE CALEFACCIÓN

Con el grafico de cargas térmicas en función de la temperatura, la carga térmica diaria por ACS y el uso del sistema de calefacción en el edificio SCJI durante un año, dados por los días de uso anual y el horario de funcionamiento, se definen las demandas térmicas mensuales de calefacción para un año.

Teniendo en cuenta los días y horarios de uso del edificio SCJI, definidos en el apartado Condiciones de uso del sistema de climatización, se identifica que en los meses de enero y febrero no existe demanda de calefacción. Por otro lado, el mes de julio considera las semanas correspondientes a receso de invierno lo que limita su demanda energética de calefacción.

En la Figura 5 se presentan las cargas térmicas mensuales para el edificio SCJI.

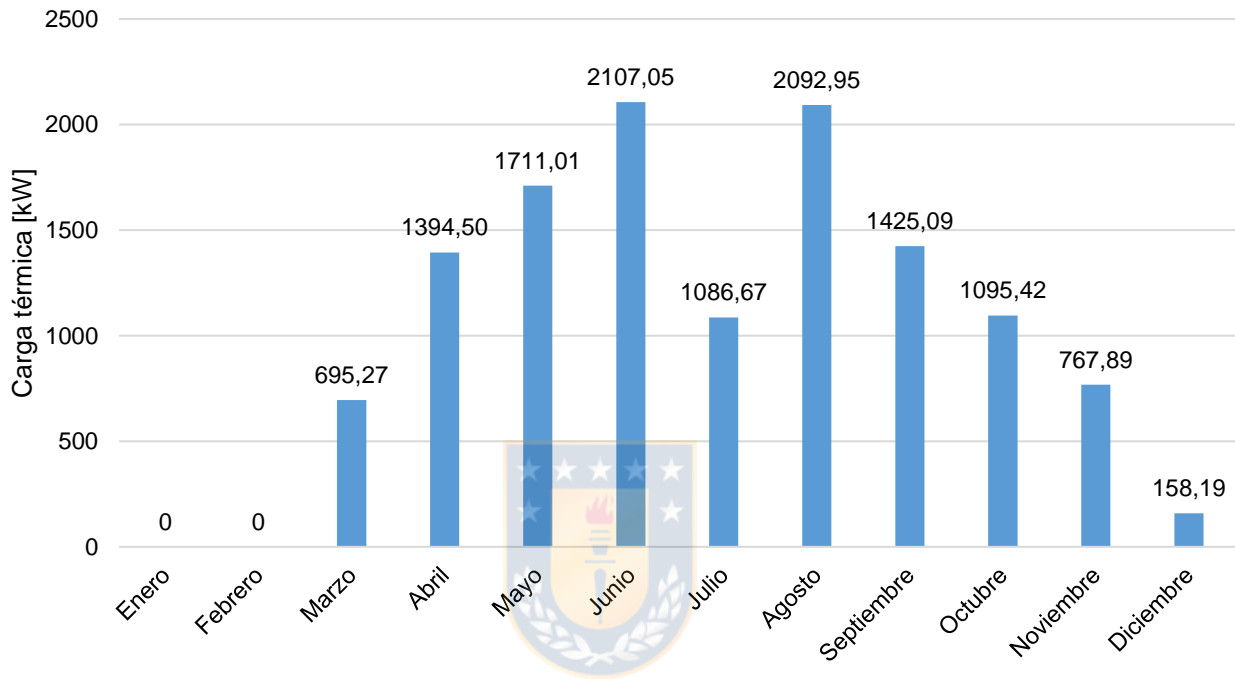


Figura 5: Gráfico de cargas térmicas mensuales para calefacción y ACS.

Mediante el cálculo previo de cargas térmicas mensuales se determina la demanda energética anual del edificio SCJI, que será de 12.534,04 kW para un horario de funcionamiento desde las 7:00 horas a las 16:00 horas para los días de.

En un caso aparte al calculado previamente, si la BCG funcionase a la capacidad de la carga térmica crítica para los días y horarios de funcionamiento del edificio SCJI, la demanda energética anual del edificio será de 32205,60 kW. Este último caso presentado será útil para entender los efectos económicos de entregar mayor capacidad térmica a través del sistema geotérmico en contraste a un sistema convencional.

7. MODELIZACIÓN DE LA CAPTACIÓN

.El objetivo de esta sección es evaluar la sostenibilidad de la explotación geotérmica mediante el método analítico y el método de simulación numérica.

Para completar el desarrollo de la modelización del sistema de captación abierta se definirá un caso estándar decretado por el modelo analítico, y se procederá a utilizar el modelado numérico mediante el software FEFLOW para evaluar los efectos térmicos en el terreno y de interferencia al variar parámetros térmicos y de flujo.

7.1 VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO

El caudal de captación de agua para satisfacer la demanda energética requerida por la BCG y la temperatura del agua reinyectada son variables de funcionamiento que definen los efectos térmicos y de flujo en una captación geotérmica de muy baja entalpía en sistema abierto.

Para evitar estimar los parámetros de funcionamiento en el caso de estudio, se selecciona una BCG con una potencia térmica suficiente para alimentar al sistema de calefacción en el periodo crítico de demanda térmica, y en base a su información técnica se determinan los valores de caudal nominal de alimentación, variación de temperatura generada en el caudal captado y reinyectado, y el COP asociado a la máquina térmica.

La BCG elegida es de la marca Valliant, de modelo VWS 220/2 (Ver Anexo E.1. Especificaciones técnicas de BCG) con una potencia térmica de 20,3 kW [66]. Esta bomba de calor está fabricada para sistemas abiertos por lo que es ideal para la captación contemplada para el caso de estudio y requiere un caudal nominal de alimentación de $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, para el cual genera una diferencia de 3 °C en el agua a reinyectar. El COP asociado a esta BCG es de 3,1 para un fluido de entrada al evaporador a una temperatura de 0 °C y una temperatura de salida desde el fluido del condensador al sistema de distribución de 55 °C [66].

7.2 MODELO ANALÍTICO

Con las variables de funcionamiento definidas se realiza la evaluación de sostenibilidad del recurso hídrico y térmico; calculando el abatimiento generado por la captación de agua, la distancia de no interferencia por flujo de agua entre pozos de captación e inyección, el tiempo de interferencia térmica y la variación de temperatura en pozo de captación generada por la interferencia térmica mediante el método analítico.

Para la evaluación de sostenibilidad en método analítico, se considerará:

- 1) Un caudal constante de $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ en el circuito de alimentación a la BCG con una variación de temperatura de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ en el agua captada y reinyectada al terreno.
- 2) Periodo de 180 días y 7300 días correspondientes al uso en periodo de invierno y al uso para los 20 años de explotación (periodo de evaluación a largo plazo usado posteriormente para el análisis de viabilidad) respectivamente.
- 3) Las características de flujo y propiedades térmicas del terreno que fueron expuestas en el apartado Caso de estudio - Caracterización del terreno.
- 4) El abatimiento generado debe estar siempre por encima de la profundidad pozo, y la zona saturada entre la cota del abatimiento y el fondo del pozo debe ser capaz de alimentar el caudal de captación. Se utilizará un factor de seguridad de 2 en el largo de profundidad de pozo para asegurar la sostenibilidad hídrica.
- 5) La variación de temperatura por interferencia entre el pozo de extracción e inyección puede ser evitada con una separación adecuada. Sin embargo, dado que el espacio disponible en el caso de estudio está limitado por las dimensiones de la parcela, se procederá a utilizar la distancia máxima de separación entre dos pozos que permite la extensión de la parcela y evaluar la variación de temperatura generada en el pozo de captación en base a esta distancia máxima.

7.2.1 Resultados

La profundidad del pozo de captación resulta de la evaluación de los abatimientos para distintas profundidades de pozos mediante la Ecuación (23).

La Tabla 7 muestra los abatimientos generados en 180 y 7300 días de captación, donde se estima conveniente utilizar el caso crítico dado por los 7300 días de explotación para la selección de una profundidad mínima de pozo.

Tabla 7: Abatimientos para periodo de invierno (180 días) y duración a largo plazo de captación geotérmica (7300 días) para diferentes profundidades de pozos.

Profundidad de pozo [m]	Transmitancia asociada [$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$]	Abatimiento para 180 días [m]	Abatimiento para 7300 días [m]
10	18	8,50	10,53
15	28	5,62	6,93
20	38	4,22	5,18
25	48	3,39	4,15

Analizando los resultados expuestos se determina que la profundidad mínima suficiente para sostener el abatimiento durante 20 años de explotación es de 15 m.

A esta profundidad mínima se le aplica un factor de seguridad de 2, resultando en una profundidad de pozo de captación de 30 m. La captación de 30 m de profundidad es apta para sostener el caudal de alimentación de la BCG y genera un margen para que el nivel piezométrico pueda descender unos 15 m sin comprometer la sostenibilidad de la captación.

La distancia de no interferencia entre los dos pozos se calcula con la Ecuación (24). El resultado para dos pozos de 30 m de profundidad y considerando un gradiente hidráulico de 0,005 es de 180,93 m.

La mejor distancia entre pozos es aquella que no genera interferencia térmica entre los pozos. Sin embargo, en el caso de estudio la máxima separación entre los dos es de 44,72 m dados por la geometría del terreno en el cual se emplaza el edificio SCJI.

Debido a la que la distancia entre pozos es menor que la distancia necesaria para evitar la interferencia por flujo, la ocurrencia de esta interferencia es inminente para un caudal de captación y reinyección constante. Así, para el caso de estudio se calcula el tiempo de interferencia térmica mediante la Ecuación (25) y se obtiene que la interferencia térmica ocurrirá en 2,57 años (937 días) desde el momento que comienza la captación.

Con el tiempo de interferencia térmica se puede estimar la variación de temperatura generada en el pozo de captación debido a la interferencia térmica utilizando la Ecuación (26). Así, se obtiene que la variación de temperatura en el pozo de captación es de 1,56 °C para una diferencia de 3 °C entre la temperatura de captación y reinyección a caudal constante en un periodo de 20 años de captación.

7.3 MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico se define en base a la información geológica e hidrogeológica para en el caso de estudio y será utilizado para evaluar distintos escenarios que puedan presentarse en el terreno de la captación propuesta.

7.3.1 Hipótesis conceptuales del comportamiento del sistema

Los fenómenos de interés son el flujo hidrogeológico y el transporte de calor en un medio poroso.

Para el problema de flujo hidrogeológico se tiene un acuífero no confinado, con un medio saturado, homogéneo, isótropo, con flujo y de régimen transitorio. Donde el agua subterránea será

de densidad, viscosidad constante y no se considerará exfiltración por ascenso del nivel freático en el límite superior del modelo.

El principal material geológico que forma el acuífero son arenas negras de grano medio, el cual se condurara uniforme y sin presencia de otros materiales en el modelo.

Para el problema no se considerará el gradiente geotérmico debido a que la captación será realizada a 30 metros de superficie, donde los efectos del gradiente geotérmico pueden ser despreciados [67]. Así mismo, la recarga hídrica por precipitación no será considerada, debido a que se trata de una zona pavimentada y con obras viales de desagüe.

Para la física del problema se considera que el flujo de aguas en un medio poroso se describe mediante la ecuación (27), y el transporte de calor se resuelve a través de la ecuación (29).

7.3.2 Dominio espacial del modelo

El modelo de simulación está definido sobre un dominio espacial que constituye un trozo en el interior del acuífero de Talcahuano y está delimitado en base a las condiciones de borde dadas por isopiezas conocidas del acuífero. La profundidad del dominio es de 108 metros (Ver anexo C.9. Profundidad del basamento) y se extiende desde la superficie topográfica hasta la base del acuífero demarcada por el contacto geológico inferior del acuífero con el basamento impermeable.

El lugar del emplazamiento y límites superficiales del modelo se muestran en la Figura 6, dejando un margen de aproximadamente 150 m entre los pozos y los límites norte y sur del modelo.

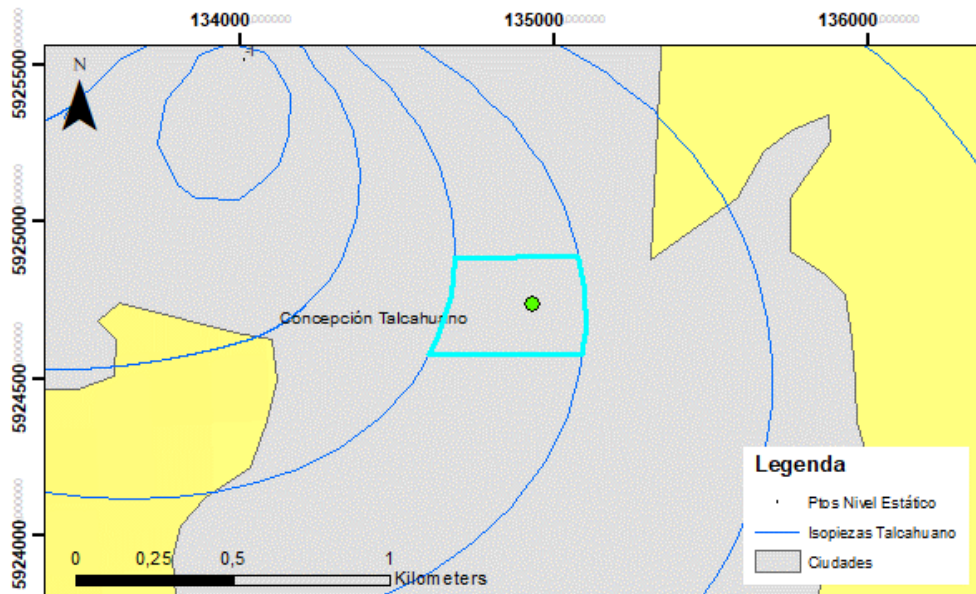


Figura 6: Dominio de modelo propuesto para el caso de estudio limitado por isopiezas del acuífero de Talcahuano [63].

7.3.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que definen el problema de flujo de agua subterránea en los bordes Este y Oeste del modelo son los niveles piezométricos conocidos del acuífero de 7 m.s.n.m. y 5 m.s.n.m. respectivamente (Ver Figura 7). Estos valores son conocidos y asignados en base a los mapas de isopiezas creados por estudios previos sobre el acuífero de Talcahuano [63].

Los bordes Este y Oeste serán los límites a través de los cuales se producen las entradas y salidas de agua del modelo.

Los dos pozos que constituyen la captación geotérmica están definidos mediante los caudales de captación y reinyección dados por la capacidad de la BCG y que un valor de $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ cada uno. Como su caudal es igual no se producirá una salida o entrada neta de agua al modelo. La profundidad de pozos es de 30 m y ha sido definida a partir del análisis previo realizado en base al modelo analítico.

Para el caso de transporte de calor la condición inicial de temperatura del modelo será igual al promedio de temperatura ambiental en la zona con un valor de $13,1 \text{ }^\circ\text{C}$ [18]. Por otra parte se añade como condición al borde lateral de entrada de flujo de aguas una temperatura de $13,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

La salida de energía térmica se producirá a través del borde Oeste modelo y el pozo de captación. La temperatura de flujo de reinyección será de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ menor a la de captación, se agregará a la simulación mediante el plug-in "OpenLoop". El plug-in "OpenLoop" es una herramienta de FEFLOW utilizada en captaciones abiertas para facilitar el ingreso de la temperatura del caudal de reinyección que varía cuando existe interferencia térmica.

También se considera la temperatura ambiental mensual en la superficie superior del modelo con un valor mínimo, máximo y promedio anual de $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $16,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $13,1 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente.

Las condiciones de borde adheridas al modelo se muestran en la Figura 7.

7.3.4 Distribución de parámetros hidrogeológicos y termogeológicas

Desde el punto de vista de flujo hidrogeológico las propiedades de los materiales que conforman el modelo son la conductividad hidráulica con un valor de $2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ en la horizontal y de $0,1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ en la vertical, la porosidad que tiene un valor de 0,35, la porosidad eficaz de 0,25 y el coeficiente de almacenamiento de $0,25 \text{ m}^{-1}$, todos ellos son valores que corresponden a las arenas de grano medio que son la litología principal de la zona [68].

Las propiedades térmicas de los materiales consideradas en el modelo son capacidad calorífica volumétrica del agua y de la arena de grano medio con valores de $4,18 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ y $1,45$

$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ respectivamente y conductividad térmica del agua y de la arena de grano medio con valores de $0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ y $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ respectivamente.

La Figura 7 muestra una representación gráfica del modelo conceptual.

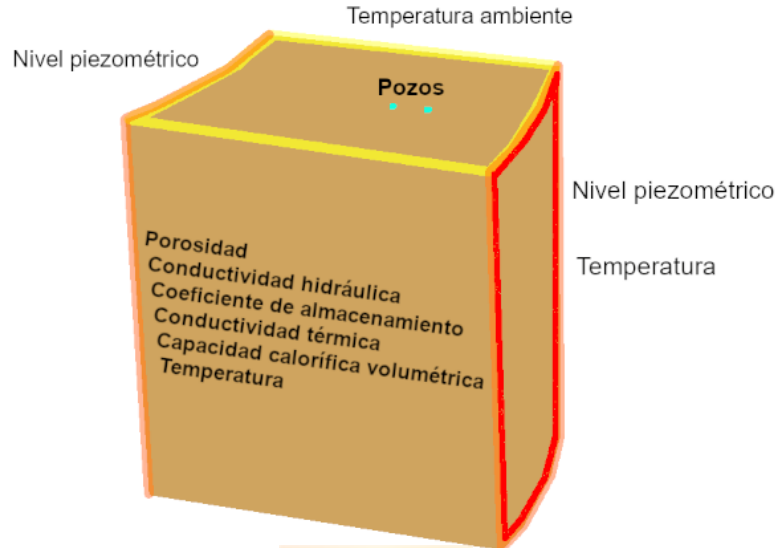


Figura 7: Condiciones de borde y propiedades de materiales en modelo simplificado 3D para captación geotérmica en circuito abierto con recirculación en FEFLOW. Modificado desde [67].

7.3.5 Parámetros de evaluación del modelo

El modelo de simulación ha sido construido en base a los resultados preliminares del modelo analítico y los datos disponibles y define la base comparativa a utilizar para evaluar el comportamiento de la captación geotérmica frente a variaciones posibles en los valores de los parámetros y condiciones de explotación asignadas inicialmente que asocian a incertidumbre.

El modelo estándar presenta incertidumbres geológicas e hidrogeológicas que no pueden ser evaluadas con los modelos analíticos propuestos. Para evaluar estas incertidumbres se definen los rangos máximos y mínimos de valores de los parámetros de materiales, condiciones de contorno y de las variables de funcionamiento que podrían darse en el caso de estudio.

Las propiedades del material arenas de grano medio evaluadas son la porosidad que tiene valor mínimo de 0,2 y un valor máximo de 0,45, la porosidad efectiva que tiene un valor mínimo de 0,1 y un valor máximo de 0,35, el coeficiente de almacenamiento que considera un valor mínimo de 0,1 [m^{-1}] y un valor máximo de 0,35 [m^{-1}], la conductividad térmica que puede tener un valor mínimo de $0,3 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ y un valor máximo de $0,45 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ y la capacidad térmica volumétrica que puede tener un valor mínimo de $1,3 \text{ [MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$ y un valor máximo de $1,6 \text{ [MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$. Estos valores

son definidos por el tipo de material presente. También se evalúa la conductividad hidráulica máxima estimada en el acuífero de Talcahuano con un valor de $2 \text{ [m}\cdot\text{d}^{-1}]$ [63].

Para las condiciones de contorno, se analiza la posible variación de la temperatura máxima del acuífero y que corresponde al único dato disponible medido en un pozo a 1,2 km de la ubicación del caso de estudio, con una temperatura de $17,4 \text{ }^\circ\text{C}$, esta evaluación tendrá el nombre de modelo de Temperatura máxima [63].

La variable de funcionamiento a tener en cuenta en la evaluación es el caudal de extracción. Esta variable es caracterizada considerando el caudal mensual acumulado resultante a partir de los horarios de uso estimados del sistema de climatización (Ver Anexo E.2. Caudal estimado). En adelante se denominara a esta variable con el nombre de Caudal Estimado.

7.3.6 Resultados

El modelo logrado no puede ser validado para el caso de estudio debido a la no existencia de datos medidos en el terreno del emplazamiento.

Los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del Modelo Estándar se describen a continuación.

El abatimiento del nivel freático en el caso de la simulación del Modelo Estándar se muestra en la Figura 8 mediante la línea de presión cero (línea blanca). Así mismo, la Figura 9 muestra los abatimientos alrededor del pozo de captación y ascenso en el pozo de reinyección. El resultado indica que en el pozo de captación hay un abatimiento de 2,9 m (Ver figura 10), manteniéndose el nivel a 25,7 m del límite inferior del pozo. Este resultado ratifica que la profundidad de los pozos de la captación es adecuada.

En términos de transferencia de calor, la simulación muestra que la pluma térmica resultante de la captación (Figuras 8 y 9) produce interferencia térmica entre los pozos. Con un descenso de temperatura en el pozo de producción de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ en 20 años, corroborando los resultados previos del modelo analítico.

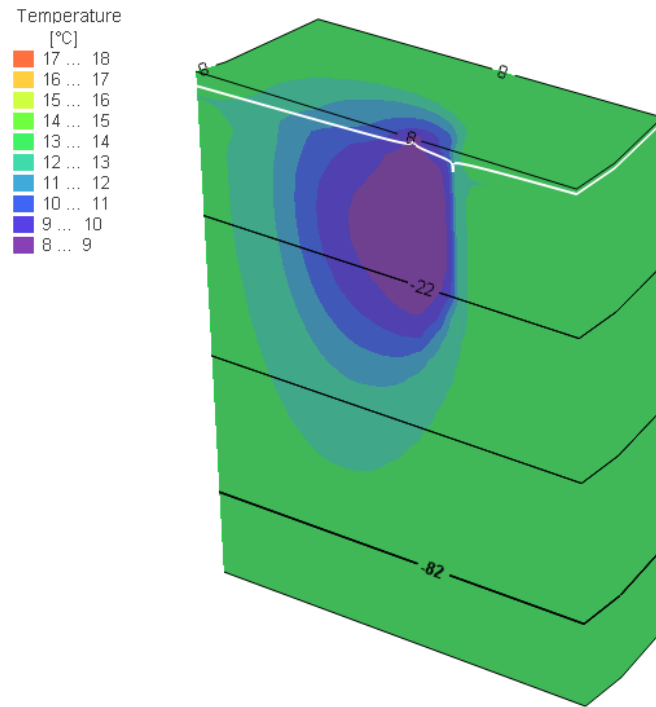


Figura 8: Vista aérea modelo estándar resultante.

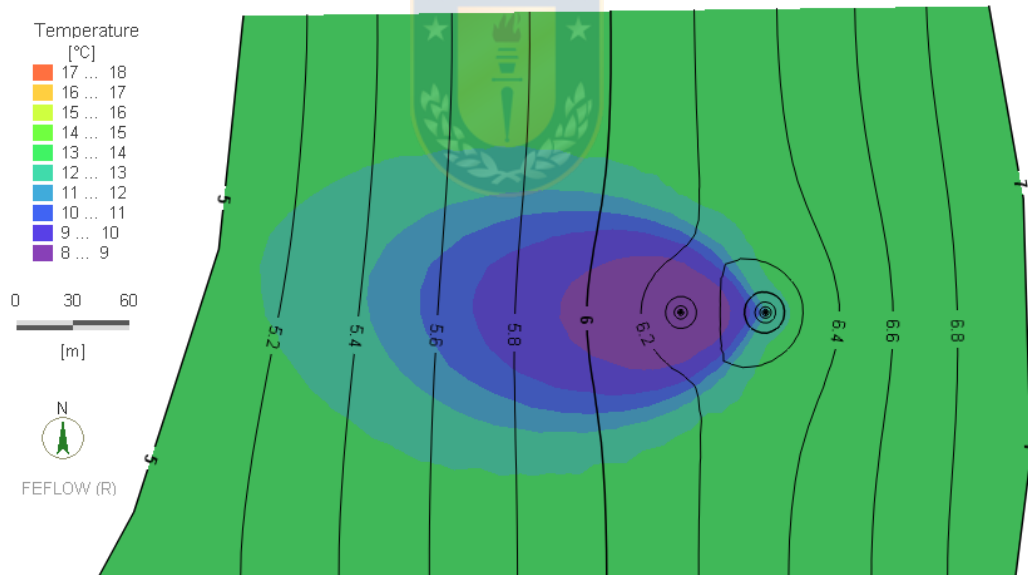


Figura 9: Vista en planta a -22 m.s.n.m. en modelo estándar.

Respecto a los modelos de evaluación, los resultados se describen a continuación.

En términos de flujo de agua subterránea, los abatimientos para el modelo de evaluación de Caudal Estimado, conductividad hidráulica máxima y su comparación con el Modelo Estándar se muestran en la Figura 11. Estos resultados indican que el abatimiento del caso estándar es de mayor magnitud que para los casos de Caudal Estimado y conductividad hidráulica máxima.

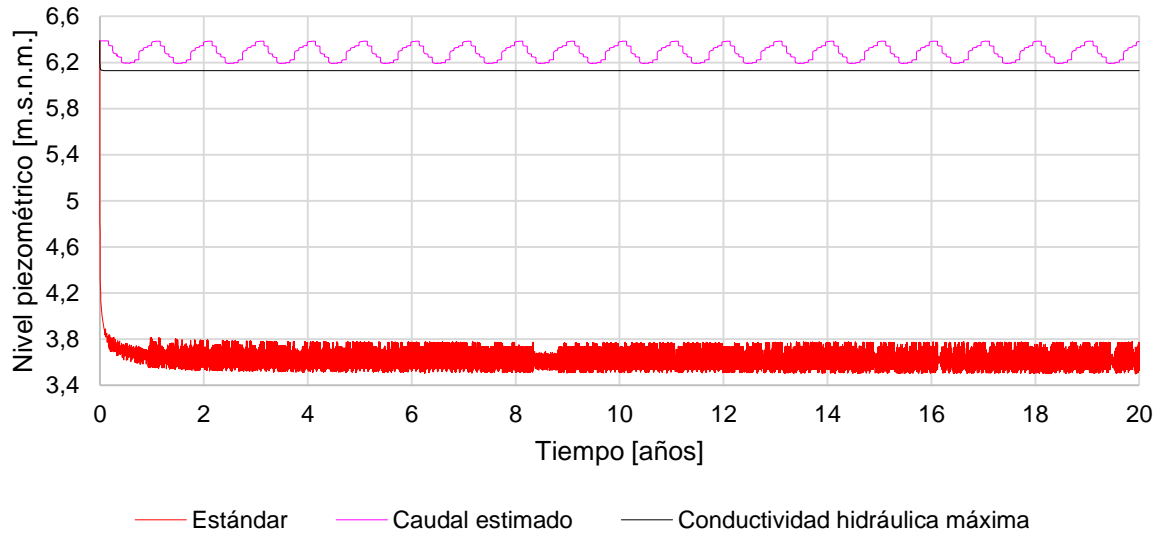


Figura 10: Niveles piezométricos en pozos de captación en 20 años para casos evaluados.

Respecto a las temperaturas, en la Figura 11 se muestra un resumen de la evolución de temperaturas en el pozo de captación para los rangos de evaluación de los diferentes parámetros y de caudal de bombeo (Caudal Estimado), junto con los resultados del Modelo Estándar.

Los resultados obtenidos muestran que la evolución de la temperatura promedio en el pozo de captación en el Modelo Estándar no supera los $-1,5$ °C. Sabiendo que la condición inicial de temperatura es de $13,1$ °C, la temperatura de captación no descenderá de los $11,6$ °C en 20 años según este modelo.

La variación en los resultados de simulación en términos de temperaturas, para los rangos evaluados de la capacidad térmica volumétrica, la conductividad térmica, la porosidad, la porosidad eficaz y el coeficiente de almacenamiento siguen la misma tendencia que el Modelo Estándar, y no superan los $-1,5$ °C de variación de temperatura en el pozo de captación para una simulación que considera 20 años de explotación.

La mayor variación de temperatura por interferencia térmica del pozo de inyección sobre el de captación se observa en el caso de evaluación en el cual se asigna la temperatura máxima del acuífero (Figura 11), donde se produce un descenso de $-2,5$ °C en el pozo de captación a los 20 años de explotación.

Entre los casos evaluados destacan el modelo de Caudal Estimado y el de conductividad hidráulica máxima donde la simulación indica que no se produce interferencia térmica. Esto se debe a que en ambos casos el flujo de agua subterránea impide que la pluma térmica generada desde el pozo de inyección alcance al pozo de producción que se sitúa aguas arriba.

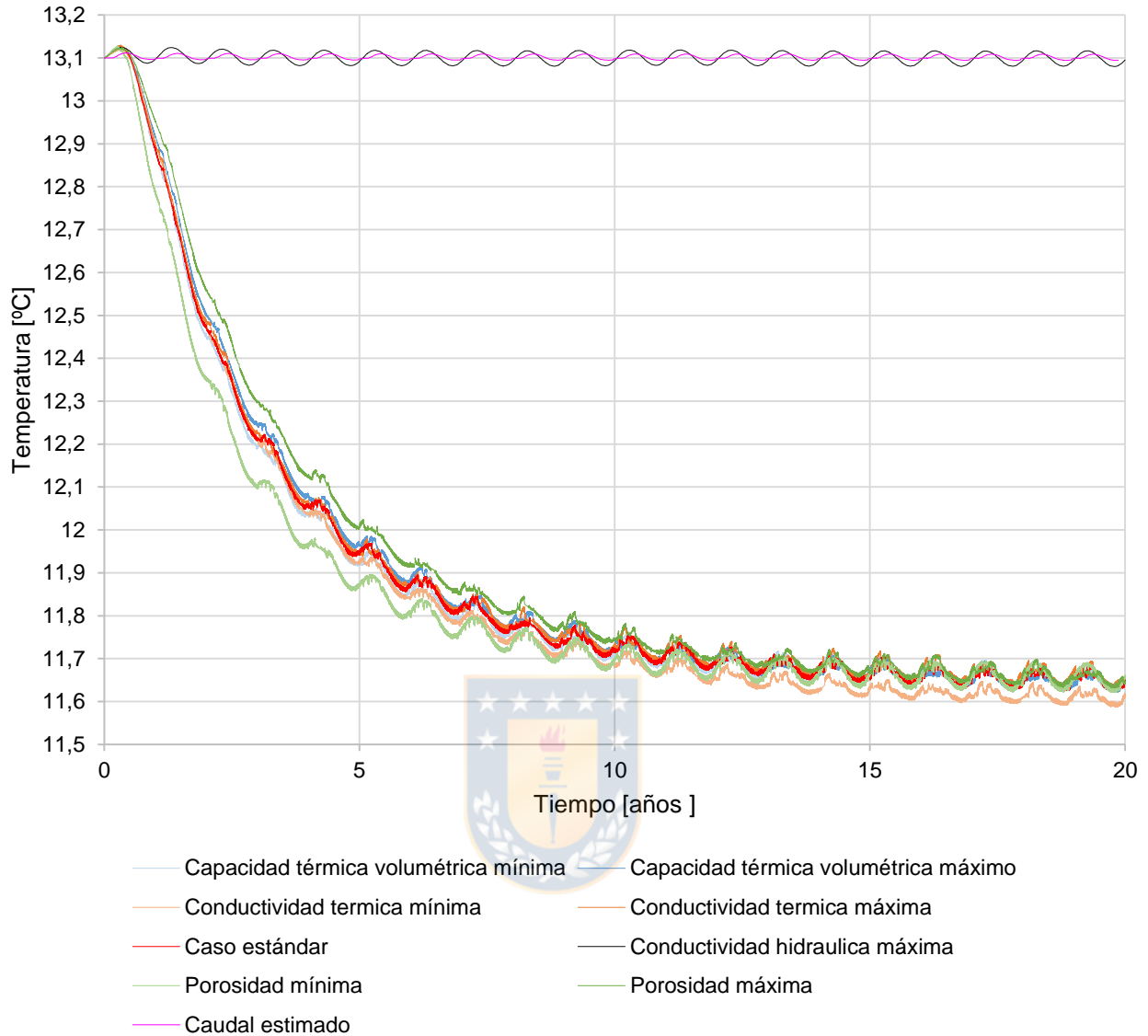


Figura 11: Evolución de temperatura en el pozo de captación para casos de evaluación en modelos numéricos.

La geometría de las plumas de calor resultantes de la explotación geotérmica para los parámetros evaluación difieren del modelo Estándar, el cual presenta una pluma de calor de 171,2 m de ancho y con 224,57 m de largo. Entre los parámetros de evaluación modelados destacan los modelos de Caudal Estimado y de Conductividad hidráulica máxima.

El modelo de Caudal Estimado presenta una pluma de calor con un ancho de 66,40 m y un alcance de 151,10 m, por otra parte el modelo de Conductividad hidráulica máxima resulta con una pluma de calor de 94,30 m de ancho y un largo de al menos 245,70 metros, debido a que su longitud total no alcanza a ser apreciado por las dimensiones del modelo.

En la Figura 12 se observan las plumas de calor para los parámetros de evaluación simulados en el modelo numérico (Modelo Estándar se encuentra en la Figura 9).

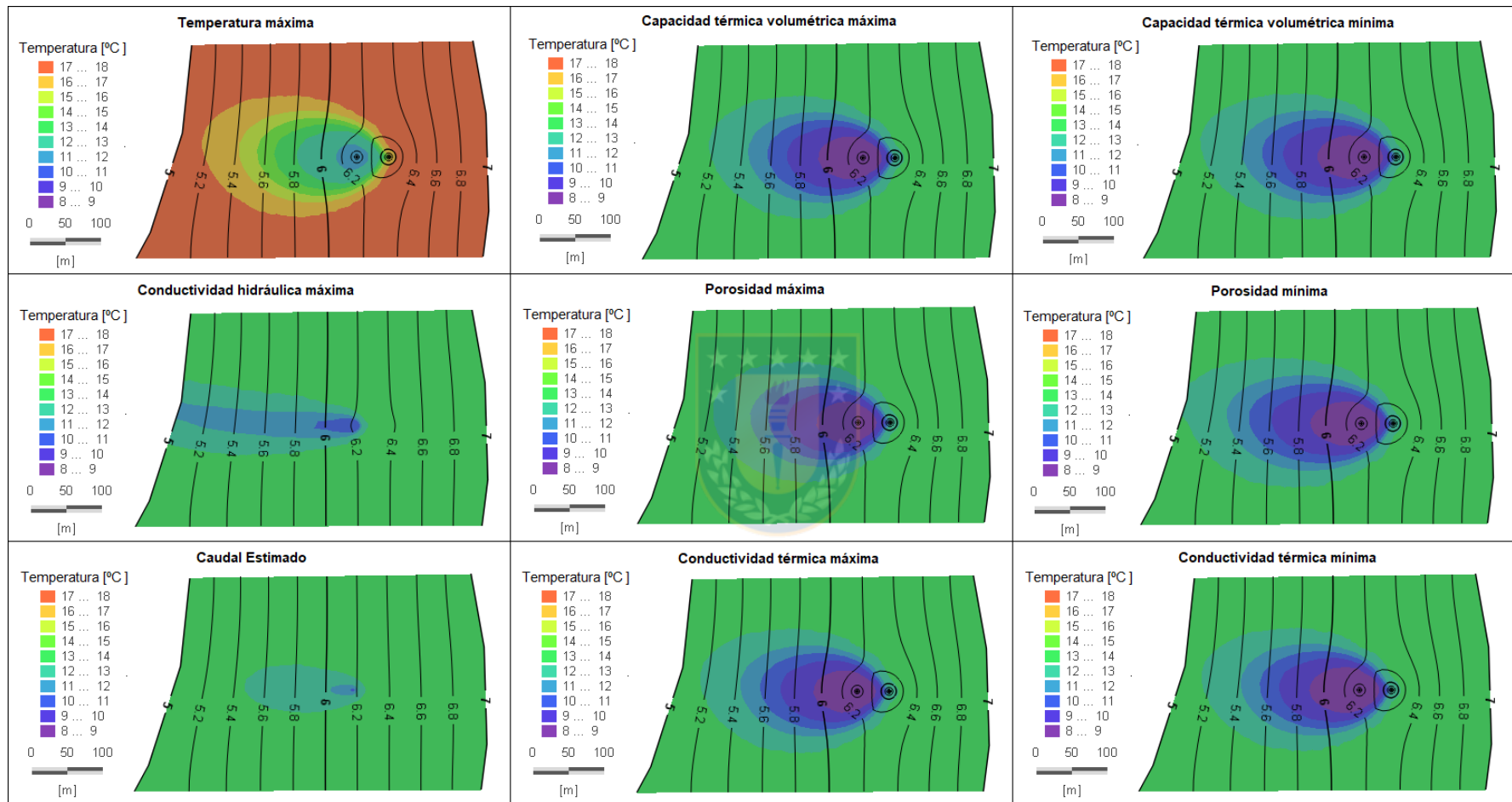


Figura 12: Vista en planta a -22 m.s.n.m. en los parámetros de evaluación simulados con el modelo numérico mediante FEFLOW.

8. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica se realiza mediante un estudio de prefactibilidad técnico-económica, comparando los costos asociados al sistema de climatización geotérmico con el sistema de climatización convencional instalado en el edificio, mediante la metodología del VAN y tiempo de retorno para tasas de descuento favorables, esperadas y desfavorables.

8.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión corresponden a los costos asociados a la implementación del sistema de climatización con energía geotérmica y el sistema convencional instalado en el edificio SCJI.

El diseño propuesto para el sistema de climatización por geotermia cuenta con una BCG de 20,3 kW de potencia máxima de calefacción, con dos pozos de 30 m de profundidad y un sistema de distribución con radiadores de baja temperatura capaces de entregar 16 kW de potencia térmica.

Los valores estimados para los componente del sistema geotérmicos son los siguientes; bomba de calor geotérmica de 20,3 kWh de potencia térmica con capacidad de inversión y ACS a un costo de 3.619.830 CLP, realización de pozos de captación y reinyección a un costo de 6.600.000 CLP, radiadores a un costo de 1.416.389 CLP, instalación de sistema de distribución, BCG y sistema de captación e insumos a un costo de 4.654.488 CLP [53]. Estos componentes hacen un total de 16.990.707 CLP, a lo que se debe agregar el valor del Impuesto al Valor Agregado (IVA) de 19%, resultando en un total de 19.594.959 CLP.

Los costos asociados a inversión para el sistema de calefacción central instalado en el caso de estudio [56] son los siguiente; caldera a gas licuado Rinnai eco 25/28 con un costo de 714.000 CLP, estanque de expansión IMERA R35I de un valor de 85.575 CLP, 2 bombas circuladoras DAV 102 W con un costo de 292.302 CLP, radiadores de doble placa y válvulas con un costo aproximado de 1.052.041 CLP y uniones, tuberías PEX e instalación del sistema con un coste de 1.190.000 CLP. En total el costo asciende a un valor aproximado de 4.158.048 CLP con IVA incluido, según precios obtenidos del mercado nacional.

Adicionalmente, se un sistema de calefacción con caldera a pellet con iguales costos que el sistema de calefacción a gas licuado a exceptuar por la inversión de la caldera. La caldera a pellet con potencia térmica de 21 kW tiene un costo de 3.610.000 CLP con IVA incluido.

8.2 COSTOS OPERACIONALES

Los costos operacionales están asociados al uso del sistema de climatización, estos se evalúan para el periodo de un año y se asume que el consumo y costes de energía serán fijos para los meses y años de la evaluación económica [9].

Los costos operacionales considerados serán dados por la tarifa de consumo eléctrico de los equipos, la tarifa de consumo de gas licuado de la caldera y las mantenciones requeridas por los equipos. Para el caso de costos por consumo eléctrico y de gas licuado estos están dados por la demanda energética anual de climatización y ACS calculadas previamente, y los costos por mantenciones se realizarán cada 5 años.

Para el coste por consumo eléctrico anual se asume una tarifa BT2 y AT2 de uso comercial y no se consideraran cobros diferidos por tarifas especiales. El costo de consumo eléctrico obtenido es de 107,7 CLP por kW consumido [69]. El costo por consumo de gas licuado anual es un dato dado por la empresa proveedora para el sector de Talcahuano con un valor de 143,23 CLP por kW consumido [70]. Finalmente, el costo de energía dado por los pellets es de 36,97 CLP/kW, considerando la eficiencia de 0,91 de la caldera a pellets [71].

Estos costos deben ser multiplicados por la cantidad del consumo requerido anualmente por cada uno de los sistemas de climatización, dispuestos en la Tabla 9 que presenta los distintos casos propuestos a evaluar económicamente.

Las mantenciones preventivas de los equipos tienen costos de 135.202 CLP para la BCG de 20,3 kW [53], de 50.000 CLP para la caldera a gas licuado y de 100.000 CLP para la caldera de pellets según los precios de mercado.

8.3 CASOS EVALUADOS

La evaluación económica se realizara para tres casos propuestos, que se diferencian en el uso de calefacción y la temperatura de entrada a la BCG.

Caso 1, corresponde al caso en que se satisface la demanda térmica anual de climatización estimada en el apartado Cálculo de demanda energética, esto es la energía térmica demandada en función de la temperatura exterior y los periodos de uso del edificio. La temperatura del acuífero se considera de 13,1 °C.

Caso 2, la demanda energética anual corresponderá al caso que la carga térmica crítica es exigida para cada hora de uso del sistema de calefacción (19,88 kW). Este caso asume una mayor

carga térmica anual a entregar en el edificio para calefaccionar los distintos espacios durante el año. Al igual que el en el Caso 1, la temperatura del acuífero es de 13,1 °C.

Caso 3, considera la demanda térmica anual de climatización estimada en el apartado Cálculo de demanda energética y una temperatura de 17,4 °C en el acuífero.

Según la aproximación de Tarnawski los COP resultantes para 13,1 °C y 17,4 °C son de 3,73 y 3,94 respectivamente para la BCG seleccionada. Estos COP serán considerados constantes para la evaluación económica debido a que la temperatura de captación será considerada constante.

Los consumos energéticos para el funcionamiento del sistema geotérmico para los Casos 1, 2 y 3, calculados con los COP respectivos a cada caso. Donde el consumo eléctrico de las bombas circuladoras dado por sus capacidades nominales por horas de funcionamiento, el consumo eléctrico de la BCG es calculado mediante la demanda energética anual y el COP, y finalmente consumo eléctrico y el consumo de gas licuado es calculado mediante la capacidad eléctrica nominal de la caldera en función del tiempo y la demanda energética anual en función de la eficiencia de la caldera respectivamente. De igual manera se procede a calcular los costos del sistema a caldera con pellets.

La Tabla 15 presente en el Anexo F. Evaluación económica, presenta los gastos energéticos utilizados por los diferentes componentes de los sistemas para los casos 1, 2 y 3.

Establecidos los costos de operación, inversión y los casos de estudio de los sistemas de calefacción se realiza la comparación de costes mediante VAN. Se evalúan tasas de descuento favorables (5%), esperadas (10%) y desfavorables (15%) para los Casos 1, 2 y 3.

8.4 RESULTADOS

Para todos los casos evaluados el sistema por pellet es superior en términos de costos. Destacar que el sistema de climatización en la zona del emplazamiento del edificio, así como el uso del edificio implica un nulo requerimiento de refrigeración, lo que genera que el sistema geotérmico no pueda ser evaluado para su potencial total de emisión de energía.

Haciendo un enfoque al contraste entre el sistema geotérmico y el de gas licuado tenemos que en el Caso 1 el resultado indica que existe ahorro sólo para una tasa de descuento favorable y a 14,5 años. En el Caso 2 se genera un ahorro para las tasas de descuento favorable, esperada y desfavorable en un periodo de 3,10, 3,42 y 3,81 años respectivamente. En el Caso 3 se alcanza el ahorro en 14,23 años y solo para la tasa de descuento favorable.

Los Casos 1 y 2 se diferencian en la cantidad de energía térmica que entregan los sistemas a lo largo de un año. De ello se deduce que a mayor cantidad de energía térmica entregada por el sistema de calefacción, los costes operacionales son en términos relativos más importantes que el costo de inversión generando que los bajos costos operacionales del sistema geotérmico generen un ahorro importante en contraste a los altos costos operacionales de un sistema convencional a gas licuado y haciendo viable en un menor periodo de tiempo. Por otra parte, el sistema con caldera a pellet considera un costo operacional mayor que el sistema geotérmico, pero mucho mayor que el del sistema con gas licuado, siendo la opción más económica.

Los Casos 1 y 2 se diferencian en la cantidad de energía térmica que entregan los sistemas a lo largo de un año. De ello se deduce que a mayor cantidad de energía térmica entregada por el sistema de calefacción, los costes operacionales pueden ser en términos relativos más importantes que el costo de inversión, generando que los bajos costos operacionales del sistema geotérmico generen un ahorro importante en contraste a los altos costos operacionales de un sistema convencional a gas licuado, haciendo viable en un menor periodo de tiempo al sistema geotérmico.

El Caso 3 emite la misma cantidad de energía térmica que el Caso 1, pero se diferencia en la temperatura de ingreso del agua desde el terreno a la BCG, aumentando su COP de 3,71 a 3,94. A mayor COP, mayor cantidad de energía es captada del terreno y por lo tanto se genera mayor ahorro en los costos operacionales del sistema geotérmico.

La evaluación de costes en función del tiempo para los casos 1, 2 y 3 se muestra en las Figuras 13, 14 y 15 respectivamente.

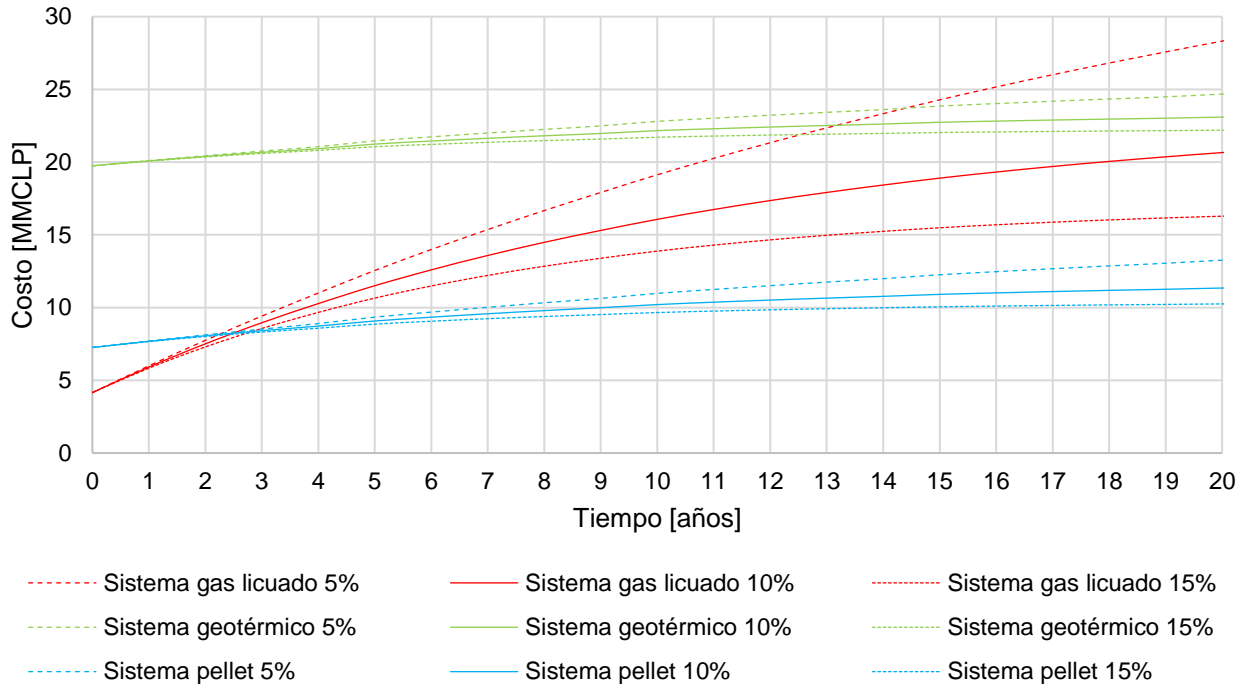


Figura 13: Costo comparativo a 20 años mediante VAN para Caso 1. El proyecto es viable a 20 años sólo para una tasa de descuento favorable en comparación a un sistema con gas licuado.

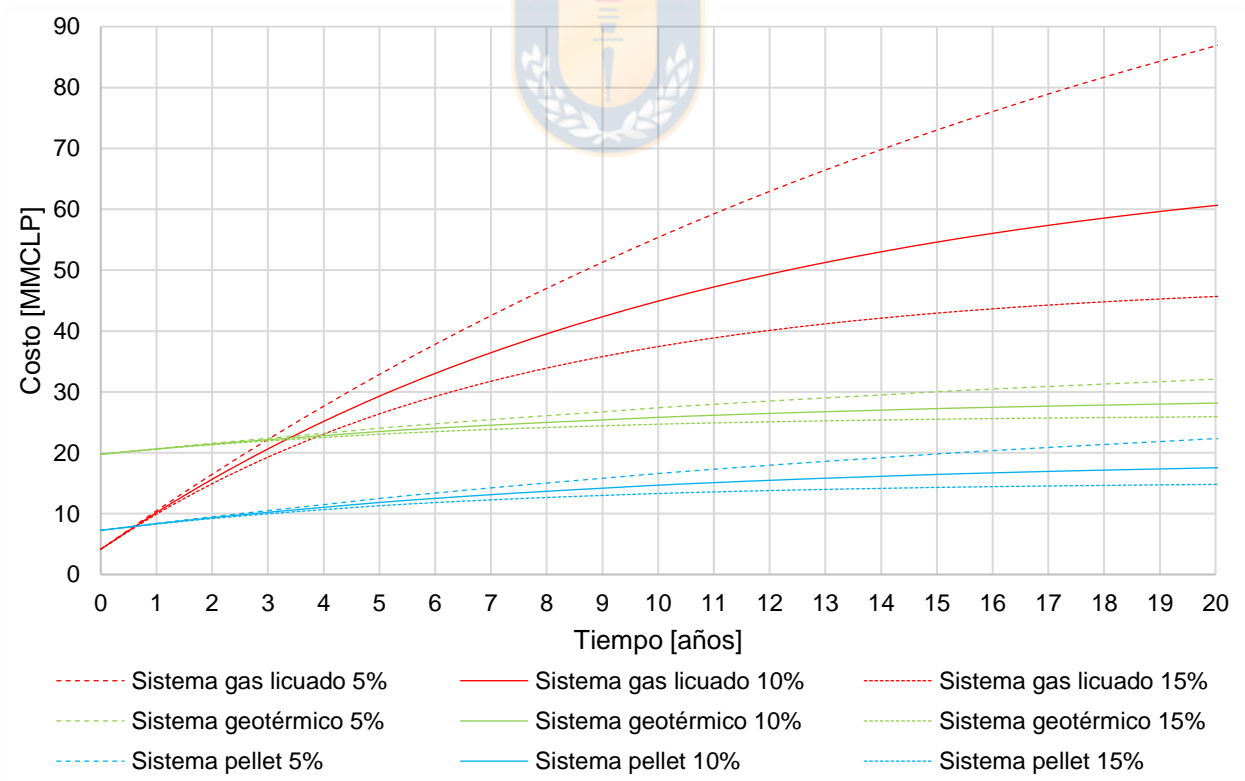


Figura 14: Costo comparativo a 20 años mediante VAN Caso 2. El proyecto es viable para los casos propuestos de tasas de descuento favorable, esperada y desfavorable en comparación a un sistema con gas licuado.

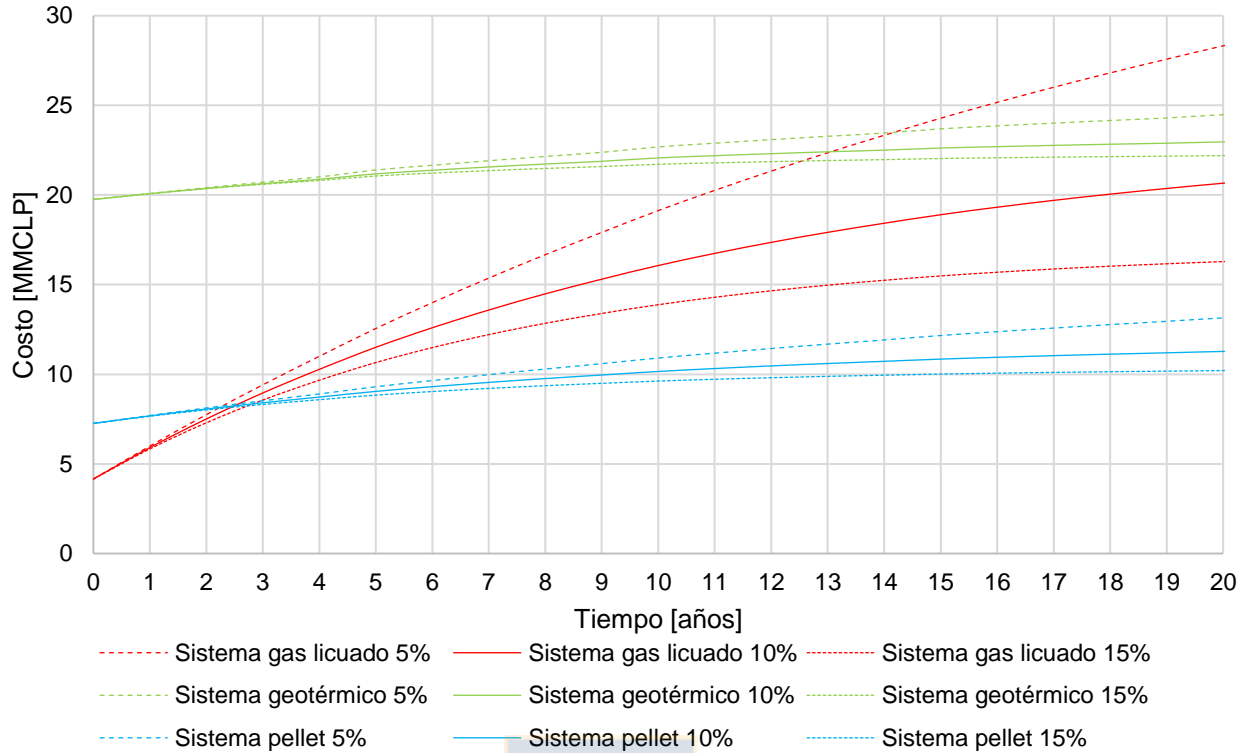


Figura 15: Costo comparativo a 20 años mediante VAN Caso 3. El proyecto es viable para los casos propuestos de tasas de descuento favorable en comparación a un sistema con gas licuado.

Los resultados muestran que el sistema geotérmico propuesto puede generar ahorros respecto a una instalación convencional a gas licuado con tasas de descuentos favorables en el caso de estudio si la demanda energética es igual a la estimada en el apartado Cálculo de demanda energética. Para mayores demandas térmicas como la usada en el Caso 2 el sistema geotérmico puede generar ahorros para las tasas de descuento evaluadas en contraste a un sistema de calefacción a gas licuado.

Finalmente, el costo de suministro de energía térmica en los 20 años de evaluación para una tasa de descuento esperada en el sistema geotérmico es de 92,3 CLP/kW, 43,71 CLP/kW y 91,59 CLP/kW para los Casos 1, 2 y 3 respectivamente. En el sistema con caldera a gas licuado por otra parte, presenta costos de suministro térmico de 79,93 CLP/kW, 91,3 CLP/kW y 79,93 CLP/kW para los Casos 1, 2 y 3 respectivamente. Así mismo, los costos para el sistema con caldera a pellet son de 41,18 CLP/kW, 26,41 CLP/kW y 41,18 CLP/kW para los Casos 1, 2 y 3 respectivamente.

9. CONCLUSIONES

El proyecto realizado logra caracterizar el comportamiento del sistema de climatización con BCG en sus tres principales componentes para evaluar su factibilidad técnica y económica. Para esto se siguieron las metodologías de cálculo de cargas térmicas y de modelización del sistema de captación propuestas por diferentes autores.

Para determinar la demanda energética anual de calefacción de 12.534,04 kWh se utilizó la metodología de las cargas térmicas críticas, la cual dio a conocer la carga térmica de calefacción en función de la temperatura ambiente exterior al edificio.

La carga crítica de invierno para calefacción y ACS es de 19,88 kW y condiciona la elección de la BCG.

La máquina térmica Valliant modelo VWS 220/2 con una potencia térmica de 20,3 kW fue seleccionada para suplir la demanda térmica del sistema de climatización. Esta BCG dispone de una bomba de captación propia con caudal de bombeo nominal de $5,30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, un COP nominal de 3,1 y una variación de temperatura nominal de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ que son los valores de parámetros de funcionamiento usados para la modelización de captación.

El modelo analítico fue usado en primera instancia para definir la captación geotérmica en sistema abierto, lo cual se logró mediante las ecuaciones presentadas. Así mismo, el modelo numérico de flujo y transporte de calor en un medio poroso es construido con éxito mediante el software FEFLOW, que logra simular el comportamiento de la captación definida previamente con el modelo analítico.

La modelización aplicando el método analítico resulta en que la captación es sostenible para una distancia de 44,73 m de separación de pozos y con perforaciones de 30 metros de profundidad en los pozos de captación y reinyección. Con esta configuración, se produce una variación de temperatura de $1,56 \text{ }^\circ\text{C}$ en el pozo de captación para los 20 años de captación para un caudal constante de captación de $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y una variación de temperatura de $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ en el agua reinyectada.

La simulación numérica reafirma que la configuración dada por el modelo analítico presenta nulos impactos en la cantidad total de recurso hídrico disponible en el acuífero y produce una baja variación de temperatura en el pozo de captación por efectos de interferencia térmica. En el Modelo Estándar esta evolución de temperatura en el pozo de captación es de $1,46 \text{ }^\circ\text{C}$ para un caudal de captación y reinyección constante en los 20 años de simulación.

El modelo numérico, también fue utilizado para evaluar comportamientos esperables en el acuífero en el cual se planea instalar el sistema geotérmico. Cabe mencionar que el modelo numérico facilita la evaluación de los parámetros de captaciones geotérmicas y añade la visualización de los efectos térmicos y de flujo causados por la captación en el medio subterráneo.

Las repercusiones en el acuífero debido a la explotación geotérmica no son significativas desde un punto de vista del recurso del agua debido a que no se afecta la disponibilidad del recurso. Así mismo, la profundidad de pozos seleccionada satisface la sostenibilidad del recurso hídrico disponible en el acuífero con creces, lo que entrega un margen para permitir fluctuaciones en el nivel piezométrico del acuífero y seguir extrayendo el caudal necesario para alimentar a la BCG.

La incertidumbre geológica dada por la capacidad térmica volumétrica, la conductividad térmica, la porosidad, la porosidad eficaz y el coeficiente de almacenamiento no presenta un problema u oportunidad al momento de realizar la captación en sistema abierto en el caso de estudio.

Respecto al conductividad hidráulica, un valor menor de esta podría resultar en que el pozo de captación no pueda entregar el caudal requerido constantemente para la profundidad seleccionada, y al contrario, si el valor el mayor al caso estándar podría evitar la interferencia térmica pero extendiendo el largo de la pluma de calor.

La variación del caudal de captación afectará la sostenibilidad del pozo de captaciones, si su valor es mayor se requerirá de una mayor profundidad en el pozo para sostener el agua extraída y de ser menor la sostenibilidad hídrica será alcanzada a una menor profundidad de pozo.

La temperatura del medio afecta el COP resultante de la BCG y por ende tiene efectos en la viabilidad económica de la captación geotérmica.

Un mayor uso del sistema geotérmico induce un mayor tiempo de captación y reinyección que produce mayores efectos en el medio, los cuales son observables en el abatimiento alrededor del pozo y el tamaño de la pluma de calor.

También fue posible construir un caso que representa de manera más realista la extracción térmica desde el terreno en el caso de estudio mediante el denominado Caudal Estimado en el modelo numérico. El resultado del modelo numérico indicó que no existe interferencia térmica por flujo de agua entre los pozos en este caso. Así, el COP de la BCG no disminuirá debido a la interferencia térmica, entregando un resultado positivo para la viabilidad económica.

La modelación numérica se ha identificado como una herramienta útil para evaluar el comportamiento térmico e hídrico de la captación otorgando flexibilidad para realizar pruebas con

distintas configuraciones que pueden ser complejas o simples, pero es recomendable realizar ensayos in-situ (ensayo de bombeo y test de respuesta térmica) que corroboren las capacidades hídricas y térmicas del terreno donde se pretende realizar la instalación para una mejor interpretación de la captación.

A pesar de la ventaja que presenta en modelo numérico frente al método analítico, el sistema de captación geotérmico propuesto es simple y puede ser evaluado mediante este último debido a la existencia de ecuaciones que estiman los efectos de una captación abierta con recirculación en un acuífero libre.

El sistema de climatización geotérmico es viable para ciertas condiciones técnicas y económicas. Las condiciones relevantes en la evaluación económica son la cantidad de energía usada para climatización y producción de ACS, el coste de inversión del sistema geotérmico, tasa de descuento, el coste de electricidad, el coste de la energía alternativa y el coste de inversión del sistema alternativo.

La tasa de descuento debe ser favorable (5%) para generar ahorro en cualquiera de los casos propuestos en el periodo de 20 años. La tasa de descuento es fundamental en la evaluación a largo plazo del proyecto por lo que se debe tener en consideración el contexto económico nacional, así como las fuentes de financiamiento de un proyecto.

La cantidad de energía demandada por el sistema de climatización y producción de ACS es la variable más importante para el cálculo debido a que el ahorro del sistema geotérmico es producido por la diferencia entre los costos operacionales entre este y el sistema convencional. Así mismo, las tarifas de acceso a electricidad y gas también pueden llegar a ser determinantes en la evaluación de estos costos.

El COP determina cuanta energía será captada del terreno y es afectado por la temperatura de entrada de agua a la BCG. Por ello, el COP de la BCG es una variable que incide en los costos operacionales del sistema geotérmico y es imperativo tener noción de la variación de este en el periodo de captación y añadirlo a la evaluación económica usando datos reales dados por la información técnica de la BCG.

El alto costo de inversión de un sistema geotérmico en sistema abierto puede ser una inversión de mediano a largo plazo (3 a 20 años) en comparación con un sistema convencional con caldera a gas licuado. Aun así, en la zona climática y para las demandas energéticas propuestas de calefacción el sistema geotérmico no logra ser viable si se compara con un sistema con caldera a pellets pero es superior en términos ambientales al no emitir gases ni material particulado.

10. RECOMENDACIONES

La mejor manera de estimar el potencial geotérmico será realizar ensayos in-situ que permitan conocer las capacidades térmicas e hidrogeológicas reales del terreno como son los ensayos de bombeo para sistemas abiertos y test de respuesta térmica para sistemas cerrados. Estos valores reales obtenidos en el emplazamiento permitirían validar el modelo analítico.

La opción de refrigeración debe ser considerada en los estudios de prefactibilidad técnico-económica cuando esta sea necesaria debido ya que aumentaría el ahorro comparativo entre un sistema geotérmico y su competencia, haciéndolo más competitivo económicamente. Por otra parte, la opción de refrigerar con un sistema geotérmico aumenta la sostenibilidad térmica al aportar calor residual al terreno en los periodos que el enfriamiento de espacios sea requerido.

Un punto importante que no fue considerado en este estudio es la ventaja ambiental que presenta un sistema geotérmico frente a otros tipos de sistemas usados para calefacción. La climatización por geotermia no produce emisión de gases contaminantes ya sean material particulado o gases de efecto invernadero aportando a la descontaminación de zonas saturadas. Este punto puede ser clave para la viabilidad del sistema si consideramos que existen políticas públicas que apuntan hacia la des carbonización de la matriz energética y al cuidado del medio ambiente que podrían traducirse en incentivos económicos que ayuden a disminuir los costes de acceso energético.

Finalmente, al analizar la prefactibilidad del sistema geotérmico desde el punto de vista técnico-económico, el estudio carece del apartado técnico específico necesario para la realización de un proyecto de energía geotérmica que vendrán dadas por la viabilidad legal, técnica-económica y de gestión para la ejecución del proyecto [72]. A pesar de esto, el estudio presenta una guía válida para generar competencias relacionadas al área de generación de un proyecto de energía geotérmica de muy baja entalpía que debe ser complementada con estudios relacionados con la configuración del sistema de distribución, configuración de la bomba de calor, realización de perforaciones e instalación de sondas geotérmicas o pozos de captación e interconexión entre estos sistemas, aspectos legales y capacidades de gestión necesaria para desarrollar las formalidades de un proyecto.

REFERENCIAS

1. Poldma, T. (2017). Hierarchy of Needs (Maslow). *The Bloomsbury Encyclopedia of Design*. <https://doi.org/10.5040/9781472596161-bed-h038>
2. Roberts, S. (2008). Energy, equity and the future of the fuel poor. *Energy Policy*, 4471-4474. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.025>
3. Smith, K., & Pillarissetti, A. (2012). Breve historia del humo de leña y sus implicaciones para Chile. University of California, Berkeley.
4. Ministerio de energía. (2020). Ministerio de energía del Gobierno de Chile. Recuperado a partir de <http://www.minenergia.cl/>
5. Llopis, G., & Rodrigo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Comunidad de Madrid.
6. Gehringer, M., & Loksha, V. (2012). *Geothermal handbook: Planning and Financing Power Generation*. Energy Sector Management Assistance Program.
7. Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>
8. Reed, A. (2013). *Energy under the andes: benefits, barriers to development, and relevant policy alternatives for Chile's untapped geothermal resources*. University of Pittsburgh.
9. Poberžnik, S., Goricanec, D., & Kroppe, J. (2007). Economic Analysis of Geothermal Heat Source for Residential Area Project. *International Journal of Energy*, 1(1), 28-32.
10. Turcotte, D., & Schubert, G. (2002). *Geodynamics, Second Edition*. Cambridge: Cambridge University.
11. Rivas, E. (2012). *Simulación mediante elementos finitos de un aprovechamiento geotérmico en la ciudad de Zaragoza*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
12. Williams, C. F., Reed, M. J., & Anderson, A. F. (2011). Updating the Classification of Geothermal Resources. *Proceedings of 36th workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
13. Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods For Regional Assessment Resources Of Geothermal. *Geothermics*, 7, 53-89.
14. Ministerio de Minería. (2000). *Ley Sobre Concesiones de Energía Geotérmica (Ley N° 19.657)*. Diario Oficial. Chile.
15. Saldivia, M. (2018). *Análisis de Legislación Comparada Sobre Energía geotérmica*. Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, Chile.
16. Servicio de Evaluación Ambiental. (2015). *Guía de evaluación de impacto ambiental sobre efectos adversos sobre recursos naturales renovables*. Chile.
17. Comisión de Hacienda de Chile. (2020). Modificación Ley N° 19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica. Chile.
18. López Jimeno, C. (2007). *El subsuelo como fuente de energía. Instalaciones geotérmicas*. Madrid: Comunidad de Madrid.

19. Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). What is geothermal energy? Italy: Istituto di Geoscienze e Georisorse.
20. Banks, D. (2012). *An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling*. John Wiley & Sons, Ltd (2.^a ed.). <https://doi.org/10.1002/9781118447512>
21. Diersch, H.-J. (2014). *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
22. Matilla, J., Arrizabalaga, I., & Navarro, P. (2018). *Sistema de intercambio geotermico de muy baja entalpia; climatización y calentamiento de agua para uso humano. Manual de geotermia de Canarias*.
23. Carvalho, A. D. (2015). *High Efficiency Ground Source Heat Pump Systems for Sustainable Building Space Conditioning*. Universidade de Coimbra.
24. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, & Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Manual de geotermia*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
25. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, & Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2010). *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización.
26. European Committee for Standardization. EN 14511-1 (2007).
27. CANMET Energy Technology Centre. (2005). *Clean energy project analysis: RETScreen engineering & cases textbook*. Canada: Government of Canada.
28. Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Sweden: Dep. of Mathematical Physics, University of Lund.
29. Ruíz, E., Hendriks, D., & Toimil, D. (2010). *Guía técnica de sistemas geotérmicos abiertos*. Fundacion de la Energia de la Comunidad de Madrid.
30. Cámara Chilena de la Construcción. (2014). *Manual de Instalaciones Térmicas*. Chile.
31. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2016). Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump. *Energies*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/en9040228>
32. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
33. Atienza Márquez, A., Cejudo López, J. M., Fernández Hernández, F., Domínguez Muñoz, F., & Carrillo Andrés, A. (2017). A comparison of heating terminal units: Fan-coil versus radiant floor, and the combination of both. *Energy and Buildings*, 138, 621-629. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.092>
34. I.T.G.E. (1988). *Manual de evaluacion técnico-economica de proyectos mineros de inversión. Instituto Tecnológico GeoMinero de España*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
35. AENOR. ISO 7730:2005 (2014).
36. Instituto de Seguridad y Salud Laboral. (2016). Confort térmico FD-124. Región de Murcia: Instituto de Seguridad y Salud.
37. Kreider, J. (2001). *Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning*. CRC Press LLC.

38. Aceituno, C. (2013). *Análisis de la demanda energética para la climatización de una vivienda*. Universidad Carlos III de Madrid.
39. ASHRAE. (2001). *Handbook 2001 Fundamentals*. Comstock, W. Stephen.
40. Escutia, R. L. (2008). *Instalaciones con aprovechamiento climática y de energía solar en edificio de residencia*. Escuela Superior Ingenieros Industriales de Sevilla.
41. CTE. (2017). *Documento básico HE ahorro de energía, Sección contribución solar mínima de agua caliente sanitaria*. CTE.
42. GEOTRAINET. (2011). *Training manual for designers of shallow geothermal systems*. GEOTRAINET: Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market.
43. Çengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa un enfoque práctico*. (McGraw-Hill, Ed.). Reno: Universidad de Nevada. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
44. Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica De Aguas Subterráneas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
45. Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos, Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Instituto Geológico y Minero de España.
46. Jaziri, N., Raymond, J., Giordano, N., & Molson, J. (2019). Long-term temperature evaluation of a ground-coupled heat pump system subject to groundwater flow. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010096>
47. Banks, D. (2009). Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: A review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1149-1155. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0427-6>
48. Clyde, C. G., & Madabhushi, G. V. (1983). Spacing of wells for heat pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109(3), 203-212.
49. White, F. M. (2003). *Mecánica De Fluidos Quinta Edición*. (S. Figeras, Ed.). Universidad Politécnica de Madrid.
50. DHI-WASY GmbH. (2009). *Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System White Papers* (Vol. 1). DHI-WASY GmbH.
51. DHI-WASY GmbH. (2017). *Feflow 7.3 Introductory Tutorial*. DHI-WASY GmbH.
52. Bauer, D., Heidemann, W., & Drück, H. (2012). Validation of a groundwater flow and transport modeling tool for borehole thermal energy stores based on FEFLOW. *Innstock: The 12th International Conference on Energy Storage*, 10.
53. NAMA. (2020). *Índice de Precios Bombas de Calor*. NAMA: Energías Renovables para Autoconsumo en Chile.
54. Secretaría ministerial educación. *Calendario escolar regional para establecimientos educacionales de la región del Biobío*. (2018).
55. Almendra, J. S. (2018). *Memoria de Cálculo Proyecto Jardín Infantil Y Sala Cuna Cruz Del Sur ID - 4411*.
56. Almendra, J. S. (2018). *Especificaciones Técnicas Proyecto Jardín Infantil Y Sala Cuna Cruz Del Sur ID - 4411*.
57. ANWO. (2012). *Catálogo radiadores ANWO*. Chile. Recuperado a partir de

<http://www.anwo.cl>

58. Climate-Data.org. (2020). Climate data for cities worldwide. Recuperado 10 de marzo de 2020, a partir de <https://en.climate-data.org>
59. ASHRAE. (2020). Climatic Design Conditions 2009/2013/2017. Recuperado 10 de febrero de 2020, a partir de <http://ashrae-meteo.info>
60. INIA. (2020). Red Agro Meteorologica del INIA. Recuperado 18 de febrero de 2020, a partir de <https://agrometeorologia.cl/>
61. Quezada, J., Cecioni, A., Esterio, H., & Pineda, V. (1997). Geogología urbana de Talcahuano. *VIII Congreso Geológico Chileno*.
62. López, E. (2017). *Estudio de Mecánica Suelos SCJI Cruz del Sur*.
63. Dirección general de Aguas. (2013). *Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins y región del Bío-Bío*.
64. Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Universidad Politécnica de Barcelona.
65. Ministerio de Vivienda. (2006). *Código Técnico de la Edificación Partes I y II*. España: Ministerio de Vivienda.
66. Vaillant GmbH. (2017). Instrucciones de instalación Bomba de Calor Valliant. GeoTHERM.
67. Piga, B., Casasso, A., Pace, F., Godio, A., & Sethi, R. (2017). Thermal impact assessment of groundwater heat pumps (GWHPs): Rigorous vs. simplified models. *Energies*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/en10091385>
68. Sánchez, J. (2017). Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. En *Hidrología Subterránea*. Universidad de Salamanca.
69. CGE. (2020). Tarifas de Suministro Eléctrico Junio.
70. Empresas Lipigas S.A. (2020). Listado de tipos de servicio de gas y servicios afines prestados por empresas lipigas S.A.
71. Technology, B. (2020). Caldera a pellet de madera Toby Smart. Santiago de Chile.
72. Sapag, N. (2011). *Proyectos de Inversión: Formulación y Evaluación* (Pearson.). Santiago de Chile.
73. Geothermal Education Office. (2020). Geothermal Education Office. Recuperado 11 de noviembre de 2019, a partir de <http://geothermaleducation.org/>
74. Google LLC. (2014). Google Maps. Recuperado 10 de enero de 2020, a partir de <https://www.google.com/maps>

Anexo A. FUNDAMENTOS DE LA GEOTÉRMICA

A.1. DIAGRAMA DE MCKELVEY

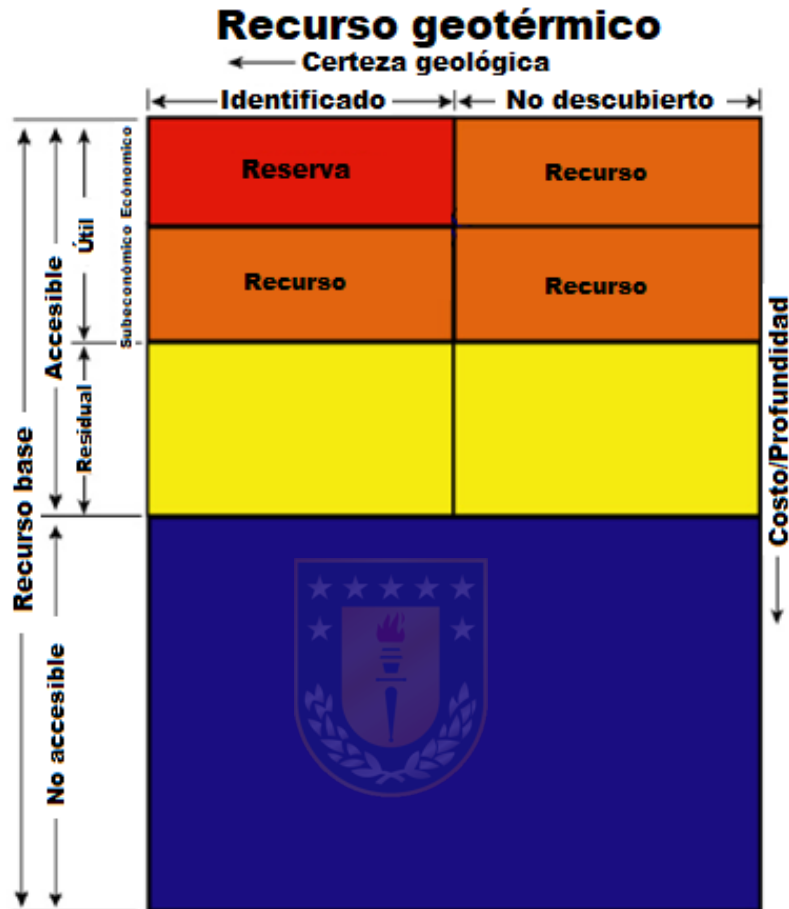


Figura 16: Diagrama de McKelvey. [12]

A.2. USOS DE LA GEOTERMIA



Figura 17: Usos para cada tipo de yacimiento geotermico según su temperatura [9,81].

Anexo B. GEOTERMIA DE MUY BAJA ENTALPÍA

B.1. SISTEMA GEOTÉRMICO DE MUY BAJA ENTALPÍA

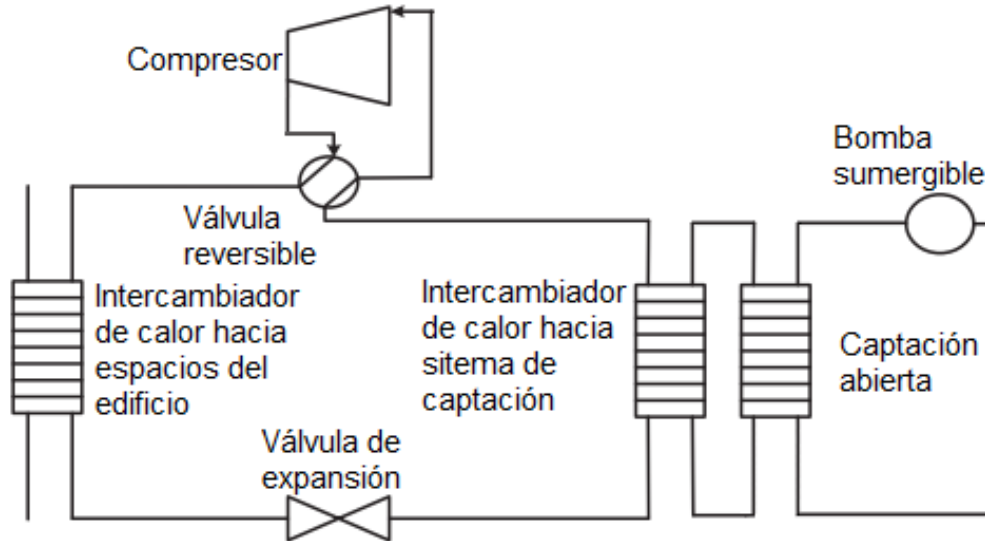


Figura 18: Diseño básico de un sistema de geotermia de muy baja entalpía con bomba de calor, modificado de [7].

B.2. FUNCIONAMIENTO BOMBA DE CALOR

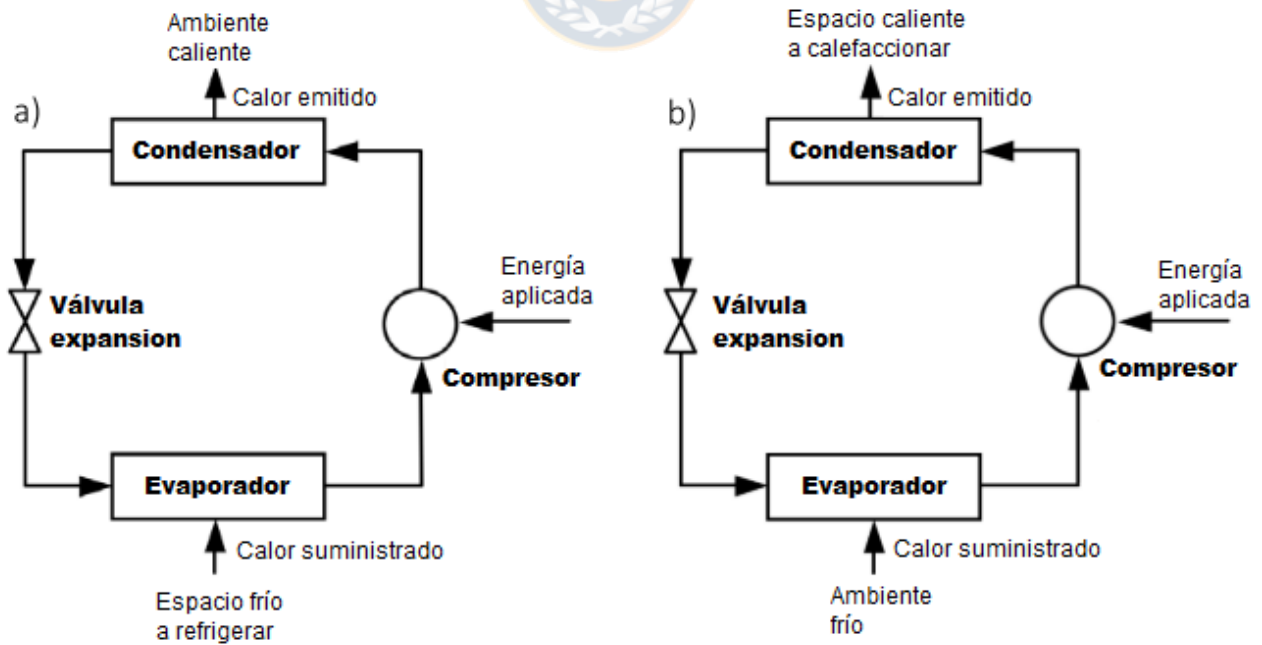


Figura 19: Ciclo de refrigeración de vapor-compresión: a) refrigeración, b) calefacción. Modificado de [23].

Anexo C. CASO DE ESTUDIO

C.1. UBICACIÓN DEL EDIFICIO SCJI

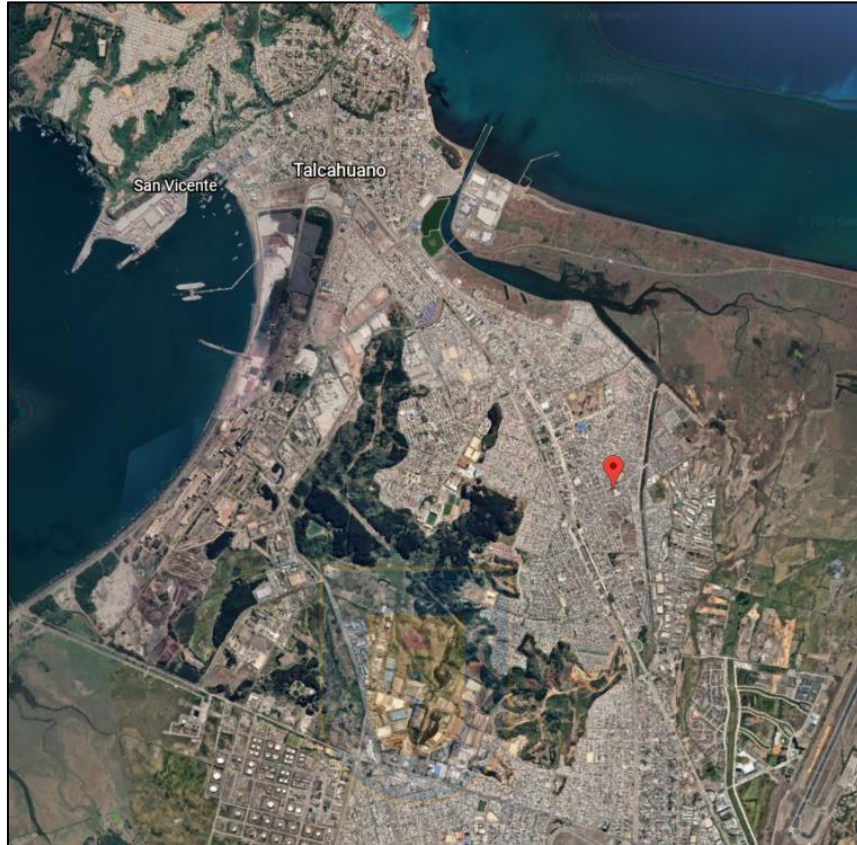


Figura 20: Vista aérea de Talcahuano y ubicación zona de estudio [74].

C.2. RADIADORES CONVENCIONALES CASO DE ESTUDIO

Tabla 8: Capacidad de ceder calor conjunto de radiadores [57].

Modelo radiador	Cantidad	Capacidad radiadores [kW]
500-500	1	0,57
500-600	5	0,68
500-1000	9	1,13
500-1100	2	1,24
Capacidad total de distribución [kW]	16,62	

C.3. DEMANDAS TÉRMICAS POR ZONA CLIMÁTICA EN CHILE

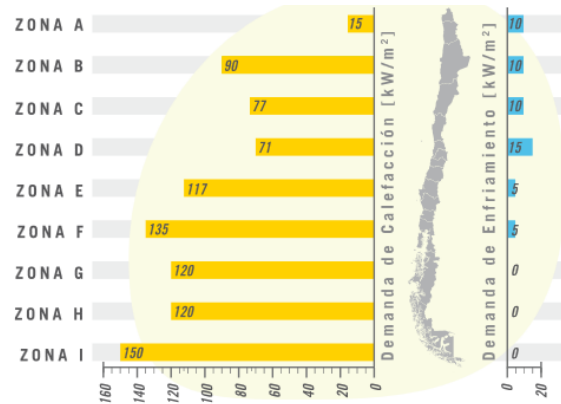


Figura 21: Demanda de calefacción y refrigeración estimada por metro cuadrado para una vivienda con norma “RT 2007” vigente [32].

C.4. TEMPERATURAS PROMEDIO EN TALCAHUANO

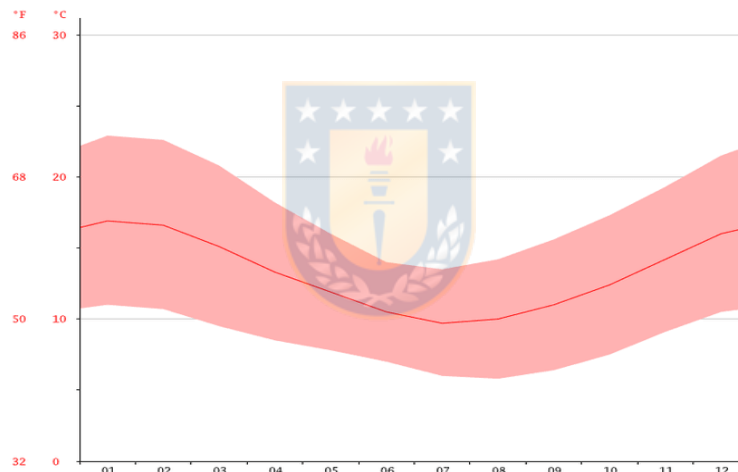


Figura 22: Temperaturas críticas promedio durante el año para la comuna de Talcahuano [58].

Tabla 9: Temperaturas promedio mensual para Talcahuano. Fuente “Climate-data.org”.

Mes	Temperatura [°C]
Enero	16,9
Febrero	16,6
Marzo	15,1
Abril	13,3
Mayo	11,9
Junio	10,5
Julio	9,7
Agosto	10
Septiembre	11
Octubre	12,4
Noviembre	14,2
Diciembre	16

C.5. CARTA PSICOMÉTRICA.

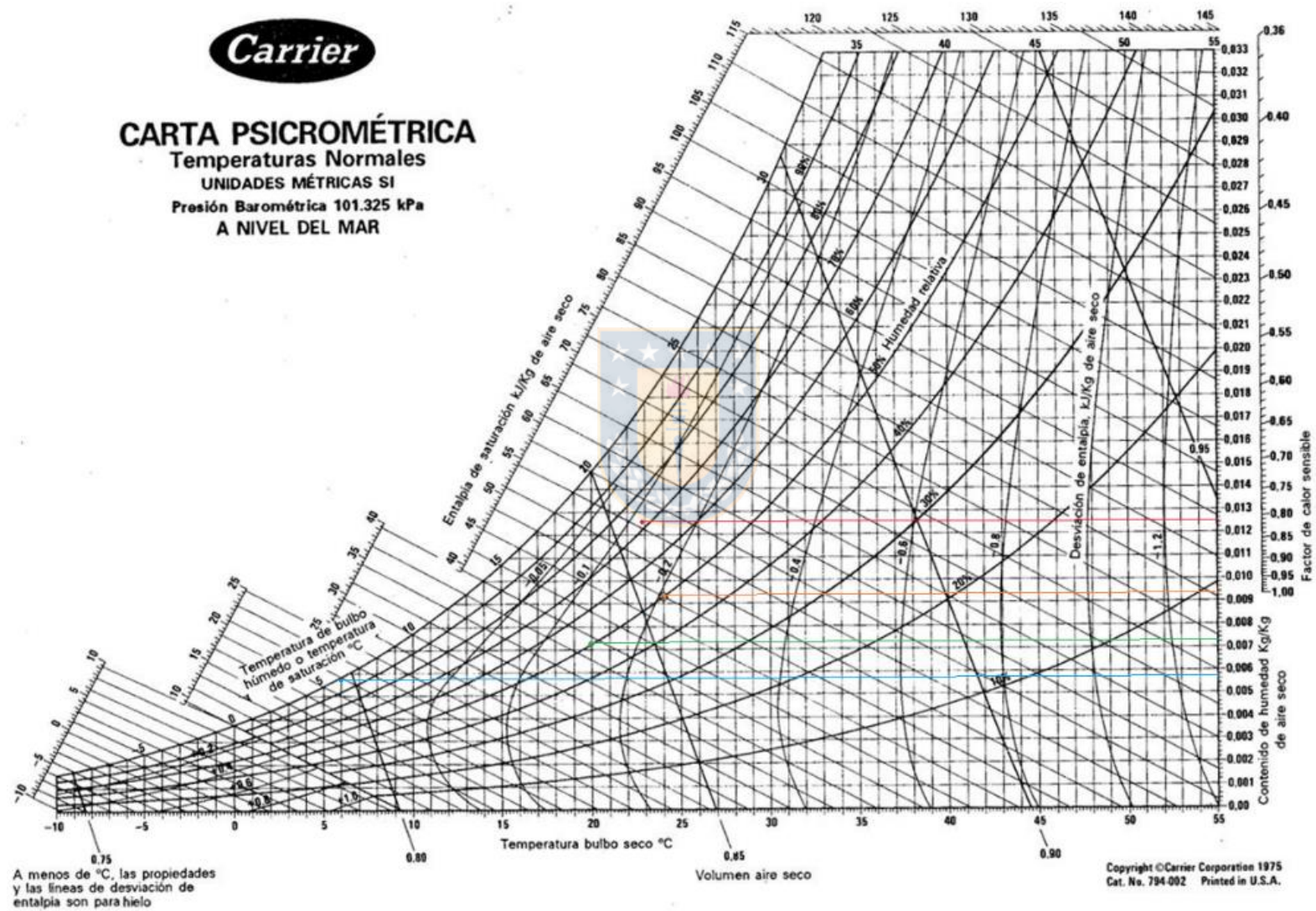


Figura 23: Carta psicrométrica con unidades del SI. Rojo demarca la temperatura y humedad crítica de invierno, celeste demarca la temperatura y humedad crítica de verano, verde demarca la temperatura y humedad objetivo de invierno y naranja demarca la temperatura y humedad objetivo de verano.

C.6. TEMPERATURA ANUAL TALCAHUANO

Tabla 10: Temperatura del aire por hora mensual en Talcahuano para el año 2018 [60].

Horario	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0:00	19,17	20,15	17,92	14,88	12,79	9,45	9,25	9,95	11,08	11,84	14,42	15,9
1:00	18,82	19,82	17,59	14,7	12,67	9,33	9,15	9,83	10,9	11,65	14,24	15,56
2:00	18,49	19,51	17,31	14,53	12,58	9,24	9,13	9,63	10,74	11,45	14,01	15,31
3:00	18,19	19,21	17,06	14,36	12,49	9,2	8,98	9,53	10,65	11,28	13,78	15,06
4:00	17,91	18,95	16,84	14,22	12,42	9,13	8,85	9,45	10,55	11,14	13,67	14,88
5:00	17,67	18,73	16,66	14,08	12,3	9,05	8,77	9,37	10,48	11,03	13,61	14,79
6:00	17,44	18,52	16,48	13,98	12,23	8,98	8,82	9,29	10,38	10,93	13,79	15,03
7:00	17,35	18,38	16,33	13,89	12,19	8,84	8,62	9,21	10,35	11,58	14,44	15,68
8:00	17,44	18,39	16,31	13,84	12,33	8,92	8,74	9,51	10,96	12,67	15,27	16,04
9:00	17,7	18,61	16,6	14,01	13,07	10,14	9,74	10,33	11,78	13,8	15,73	16,84
10:00	18,13	19,01	17,15	14,45	13,61	11,34	11,06	11,36	12,54	15,52	16,86	17,97
11:00	18,75	19,57	17,95	15,04	14,12	12,24	12,65	12,57	13,81	18,11	18,63	19,4
12:00	19,62	20,38	18,68	15,48	14,4	12,85	13,7	14,03	15,18	20,27	20,85	20,31
13:00	20,49	21,15	19,22	15,78	14,64	12,96	13,5	13,91	15,13	21,37	22,79	21,36
14:00	21,35	21,8	19,73	16,07	15,05	13,6	14,26	14,32	14,8	21,14	22,98	22,72
15:00	22,17	22,65	20,35	16,37	15,36	13,56	13,91	14,18	14,84	20,25	22,3	23,13
16:00	22,68	23,33	20,87	16,6	15,33	13,08	12,99	13,44	14,34	18,71	21,08	22,23
17:00	22,77	23,59	20,97	16,59	14,54	11,75	11,52	12,43	13,43	16,85	19,62	21,03
18:00	22,45	23,35	20,67	16,36	13,99	10,89	10,57	11,55	12,67	14,96	18,02	19,63
19:00	21,84	22,75	20,09	16,03	13,66	10,54	10,07	11,09	12,25	13,79	16,69	18,15
20:00	21,14	22,06	19,5	15,72	13,36	10,27	9,74	10,79	11,95	13,19	15,97	17,36
21:00	20,54	21,47	19,02	15,45	13,16	10,06	9,49	10,52	11,64	12,85	15,41	16,87
22:00	20,01	20,95	18,61	15,2	12,97	9,83	9,37	10,31	11,38	12,45	15,07	16,5
23:00	19,61	20,55	18,2	14,97	12,8	9,68	9,32	10,16	11,18	12,17	14,88	16,25

C.7. TEMPERATURA PROMEDIO DEL SUELO

Tabla 11: Temperatura promedio mensual del suelo para el año 2018 a 10 cm en la zona de Talcahuano [60].

Mes	Temperatura promedio suelo [°C]
Enero	21,08
Febrero	22,23
Marzo	19,76
Abril	15,41
Mayo	13,49
Junio	9,94
Julio	9,55
Agosto	10,21
Septiembre	12,37
Octubre	14,51
Noviembre	18,34
Diciembre	21,47

C.8. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA EN EL ACUÍFERO DE TALCAHUANO.

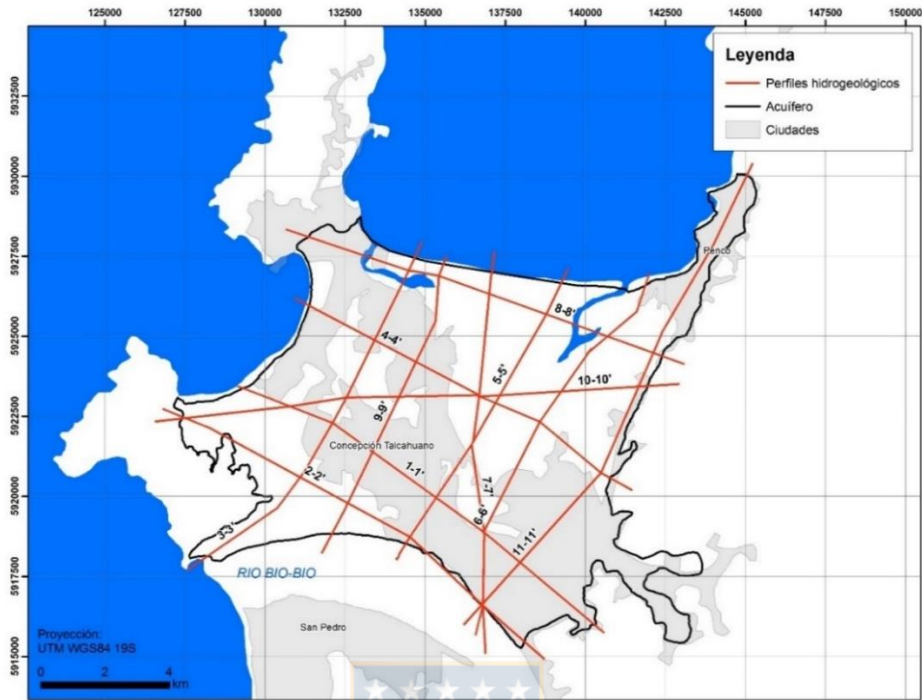


Figura 24: Perfiles topográficos realizados en el acuífero de Talcahuano [63].

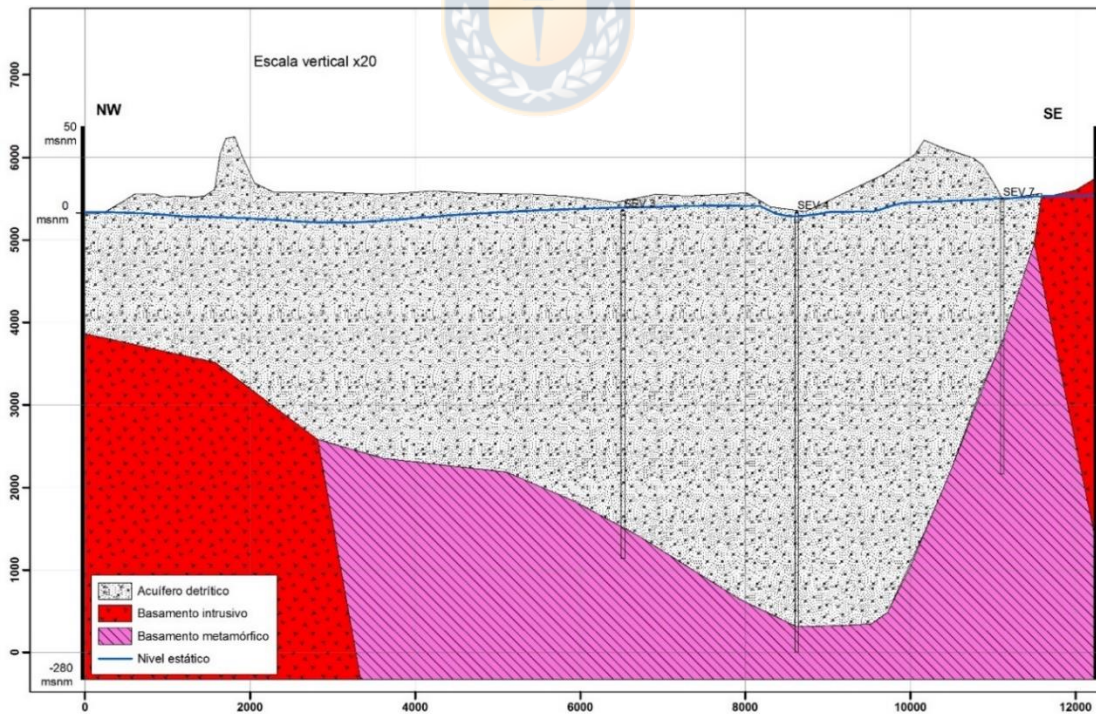


Figura 25: Perfil topográfico 4-4' del acuífero de Talcahuano, se infiere de este perfil que el basamento de la zona de interés será de tipo metamórfico [63].

SEV	X UTM	Y UTM	Z	Long. AB (m)	Prof. Inicial (m)	Prof. Final (m)	Espesor (m)	Resist. Ω m	Atribución geológica
1	670313	5933165	10	500	0	1,1	1,1	363	Tierra vegetal
					1,1	3,2	2,1	53	Detrítico grano medio
					3,2	43	40	1	Intrusión salina
					43	143	100	2,1	Intrusión salina
					143			6500	Basamento intrusivo
2	671047	5931546	-2	500	0	2,6	2,6	49	Detrítico grano medio
					2,6	8,8	6,2	3,3	Detrítico grano fino
					8,8	40	31	0,48	Intrusión salina
					40			2409	Basamento intrusivo

Figura 26: Resultado campaña de sondeos geofísicos en el acuífero de Talcahuano. La unidad "SEV-2" es el sondeo más cercano a la zona del proyecto [63].



COTA (m)	CLASIFICACIÓN USCS	DESCRIPCIÓN DEL SUELO (Apreciación Visual en Terreno)
0,00 a -0,90	 <p>Arena Límica (SM)</p>	<p>Estrato N° 1, corresponde a material arena limosa, tamaño máximo 19 mm., distribución de partículas arena 85% y fino 15%, color gris, olor ninguno, dilatancia lenta, resistencia seca baja, plasticidad baja, contenido de humedad húmedo, estructura dominante homogénea, origen relleno artificial, materia orgánica sin indicios.</p>
-0,90 a -2,50	 <p>Arena Límica (SM)</p>	<p>Estrato N° 2, corresponde a material arena limosa, tamaño máximo 9,5 mm., distribución de partículas arena 85% y fino 15%, color gris, olor orgánico, dilatancia rápida, resistencia seca muy baja, plasticidad media, contenido de humedad saturado, estructura dominante homogénea, origen residual, materia orgánica sin indicios.</p>

Figura 27: Perfil estratigráfico de prospección del suelo [62].

C.9. PROFUNDIDAD DE BASAMENTO

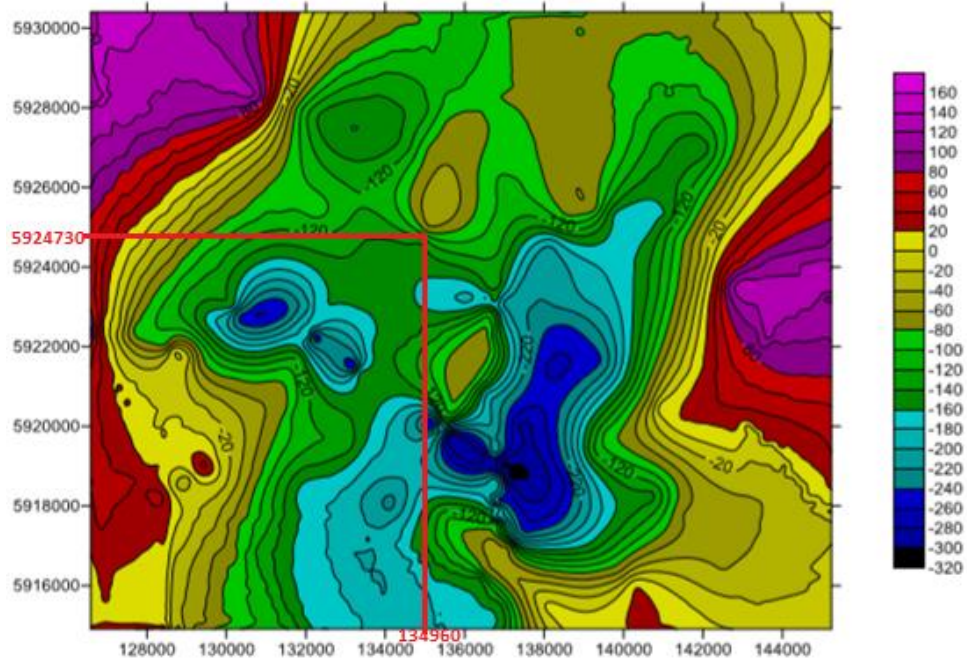


Figura 28: Profundidad estimada del basamento en el acuífero de Talcahuano SCJI en coordenadas x: 134960 e y: 5924730, modificado de [63].



C.10. VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y CAPACIDAD TÉRMICA VOLUMÉTRICA

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	(MJ/m³K)
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3-2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Grabo	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1-3,0
Peridotita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8-2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2-2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2	aprox. 1,8
Hielo (-10°C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60		3,12
Agua (+ 10 °C)		0,58		4,19

Figura 29: Valores de conductividad térmica y capacidad calorífica volumétrica para distintos tipos de roca o formación geológica [25].

C.11. ISOPIEZAS ACUÍFERO DE TALCAHUANO

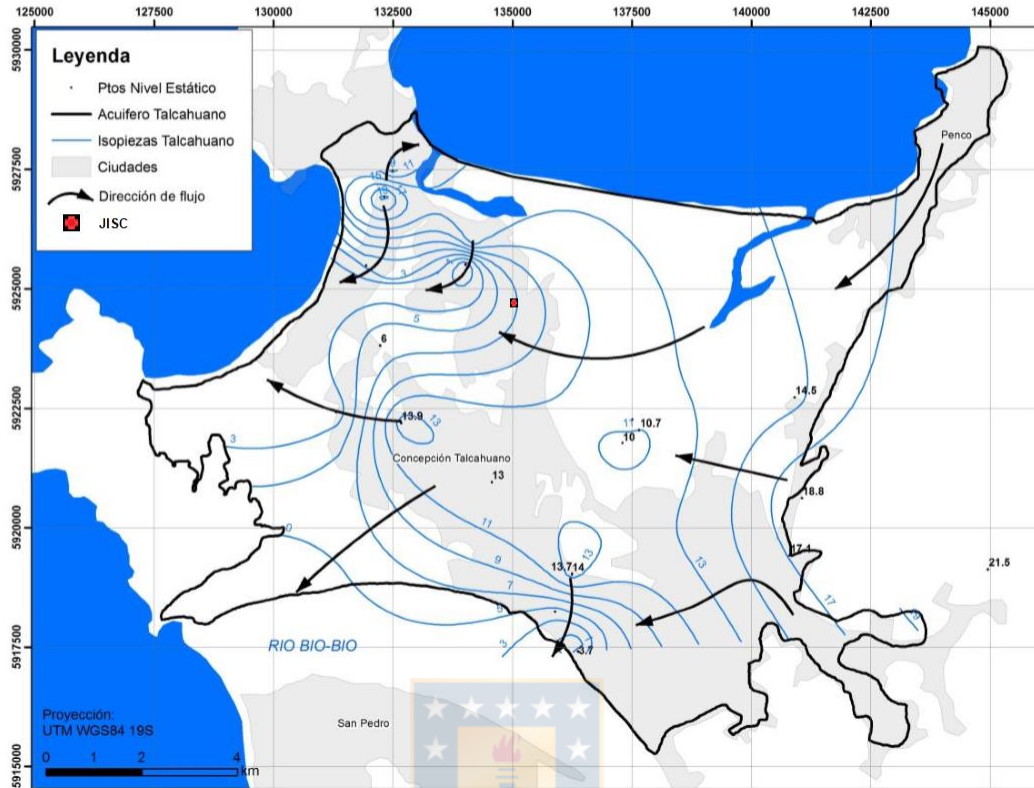


Figura 30: Nivel piezométrico, dirección del flujo de aguas y zona de caso de estudio en el acuífero de Talcahuano, modificado de [63].

C.12. POROSIDAD

Tipo	Material Descripción	Porosidad total % m				Porosidad eficaz % m _e			Observaciones	
		Media	Normal Máx.	Normal Mín.	Extraordinaria Máx. Min.	Media	Máx.	Mín.		
Rocas masivas	Granito	0,3	4	0,2	9	0,05	<0,2	0,5	0,0	A
	Caliza masiva	8	15	0,5	20		<0,5	1	0,0	B
	Dolomia	5	10	2			<0,5	1	0,0	B
Rocas metamórficas		0,5	5	0,2			<0,5	2	0,0	A
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	60	5	<5	20	0,0	C, E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C, E
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0,0	D
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0,1			<1	2	0,1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C
Rocas sedimentarias consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0,5	<2	5	0,0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0,5	10	20	0,0	F
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0,2	B
	Caliza detrítica	10	30	1,5			3	20	0,5	
Rocas sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0,1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0,0	E
	Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E

A = Aumenta m y m_e por meteorización.
 B = Aumenta m y m_e por fenómenos de disolución.
 C = Disminuye m y m_e con la edad.
 D = Disminuye m y puede aumentar m_e con la edad.
 E = m_e muy variable según circunstancias y tiempo.
 F = Variable según el grado de cementación y su solubilidad.

Figura 31: Valores de porosidad y porosidad eficaz para distintos tipos de rocas [64].

C.13. PERMEABILIDADES ACUÍFERO DE TALCAHUANO

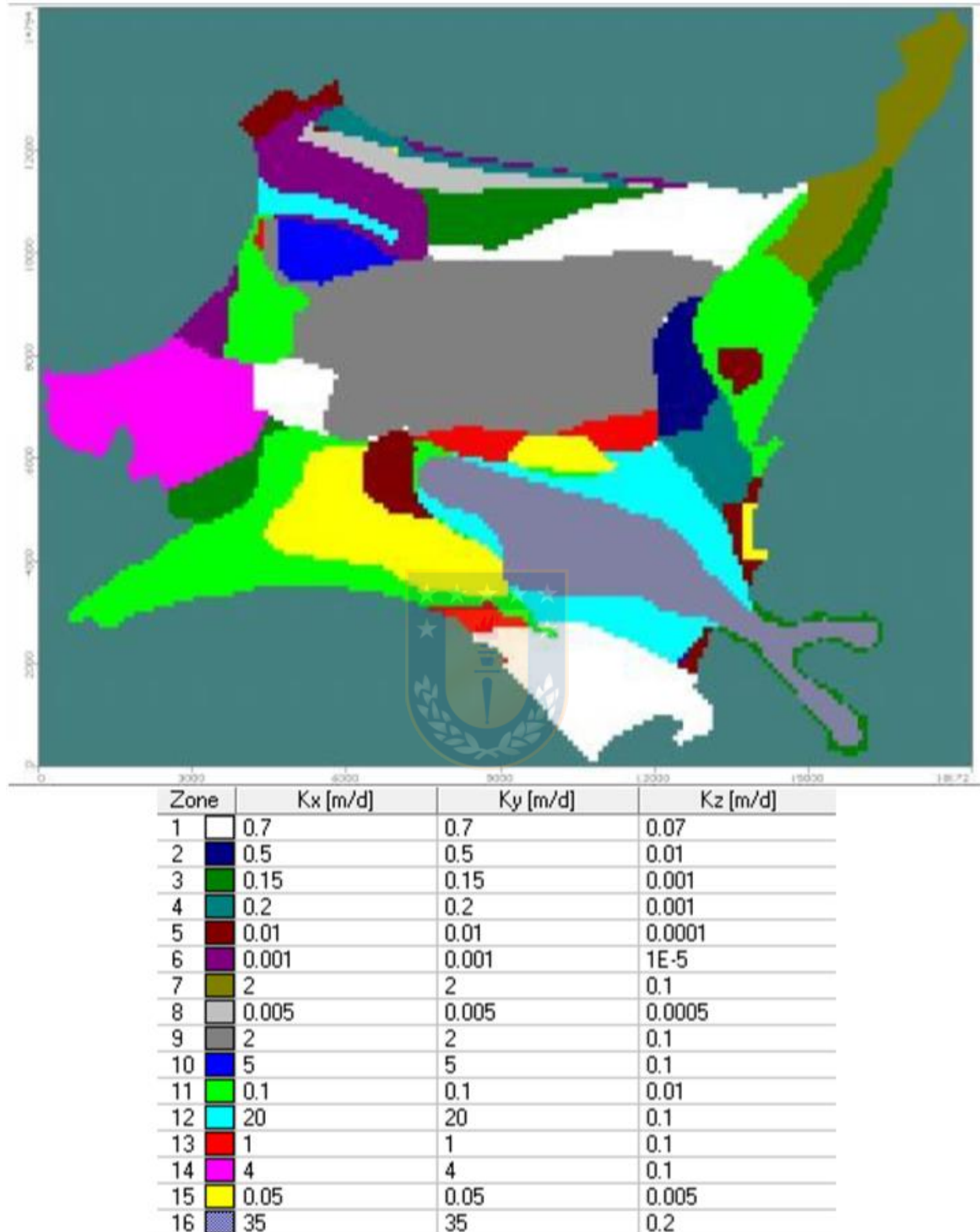


Figura 32: Permeabilidad estimada en el acuífero de Talcahuano [63].

Anexo D. CÁLCULO CARGAS TÉRMICAS

D.1. CARGAS POR VENTILACIÓN E INFILTRACIÓN.

Tabla 12: Calculo volumen de aire a renovar por hora [55].

Planta	Sala	Volumen [m ³]	Renovaciones por hora	Volumen a renovar [m ³]
Planta 1	1	66,8	1	66,8
Planta 1	2	148,7	1	148,7
Planta 1	3	30,9	6	185,4
Planta 1	4	80,7	1	80,7
Planta 1	5	25,9	1	25,9
Planta 1	6	23,1	1	23,1
Planta 1	7	36,5	1	36,5
Planta 2	8	51,5	1	51,5
Planta 2	9	146	1	146
Planta 2	10	31,2	6	187,2
Planta 2	11	59,8	1	59,8
Planta 2	12	36,4	1	36,4
Planta 2	13	9	1	9

D.2. ACS

Type of building ^a	Maximum hour	Maximum day	Average day
Men's dormitories	3.8 gal (14.4 L)/student	22.0 gal (83.4 L)/student	13.1 gal (49.7 L)/student
Women's dormitories	5.0 gal (19 L)/student	26.5 gal (100.4 L)/student	12.3 gal (46.6 L)/student
Motels: No. of units ^a			
20 or less	6.0 gal (22.7 L)/unit	35.0 gal (132.6 L)/unit	20.0 gal (75.8 L)/unit
60	5.0 gal (19.7 L)/unit	25.0 gal (94.8 L)/unit	14.0 gal (53.1 L)/unit
100 or more	4.0 gal (15.2 L)/unit	15.0 gal (56.8 L)/unit	10.0 gal (37.9 L)/unit
Nursing homes	4.5 gal (17.1 L)/bed	30.0 gal (113.7 L)/bed	18.4 gal (69.7 L)/bed
Office buildings	0.4 gal (1.5 L)/person	2.0 gal (7.6 L)/person	1.0 gal (3.8 L)/person
Food service establishments:			
Type A: full-meal restaurants and cafeterias	1.5 gal (5.7 L)/max meals/h	11.0 gal (41.7 L)/max meals/h	2.4 gal (9.1 L)/average meals/h ^c
Type B: drive-ins, grilles, luncheonettes, sandwich and snack shops	0.7 gal (2.6 L)/max meals/h	6.0 gal (22.7 L)/max meals/h	0.7 gal (2.6 L)/average meals/day ^c
Apartment houses: No. of apartments			
20 or less	12.0 gal (45.5 L)/apt.	80.0 gal (303.2 L)/apt.	42.0 gal (159.2 L)/apt.
50	10.0 gal (37.9 L)/apt.	73.0 gal (276.7 L)/apt.	40.0 gal (151.6 L)/apt.
75	8.5 gal (32.2 L)/apt.	66.0 gal (250 L)/apt.	38.0 gal (144 L)/apt.
100	7.0 gal (26.5 L)/apt.	60.0 gal (227.4 L)/apt.	37.0 gal (140.2 L)/apt.
200 or more	5.0 gal (19 L)/apt.	50.0 gal (195 L)/apt.	35.0 gal (132.7 L)/apt.
Elementary schools	0.6 gal (2.3 L)/student	1.5 gal (5.7 L)/student	0.6 gal (2.3 L)/student ^b
Junior and senior high schools	1.0 gal (3.8 L)/student	3.6 gal (13.6 L)/student	1.8 gal (6.8 L)/student ^b

Figura 33: Litros de agua a usar por persona según el uso del edificio [37].

Tabla 13: Cargas mensuales para ACS.

Mes	Temperatura promedio suelo [°C]	Carga promedio día mes [kW]
Enero	21,08	4,02
Febrero	22,23	3,88
Marzo	19,76	4,18
Abril	15,41	4,69
Mayo	13,49	4,92
Junio	9,94	5,34
Julio	9,55	5,39
Agosto	10,21	5,31
Septiembre	12,37	5,05
Octubre	14,51	4,80
Noviembre	18,34	4,35
Diciembre	21,47	3,97

Anexo E. MODELIZACIÓN DE LA CAPTACIÓN

E.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE BCG SELECCIONADA

Denominación	Unidad	VWS 220/2	VWS 300/2	VWS 380/2	VWS 460/2
Características de la bomba de calor		Los siguientes datos de rendimiento son válidos para aparatos nuevos con intercambiadores de calor limpios.			
B0/W35 ΔT 5K según DIN EN 14511					
- rendimiento de calentamiento	kW	22,0	29,8	38,3	45,9
- consumo de potencia	kW	5,0	6,5	8,5	10,0
- Índice de rendimiento/Coefficient of performance COP	-	4,4	4,6	4,5	4,6
B0/W35 ΔT 10K según DIN EN 255					
- rendimiento de calentamiento	kW	22,3	30,3	37,8	45,5
- consumo de potencia	kW	4,7	6,3	8,0	9,7
- Índice de rendimiento/Coefficient of performance COP	-	4,60	4,8	4,7	4,7
B0/W55 ΔT 5K según DIN EN 14511					
- rendimiento de calentamiento	kW	20,3	26,8	36,2	42,3
- consumo de potencia	kW	6,6	8,8	11,7	14,1
- Índice de rendimiento/Coefficient of performance COP	-	3,1	3,0	3,1	3,0
Circuito de la fuente de calor / Circuito de la solución salina		Etilenglicol/mín. 25% vol., max. 30% vol.			
- Tipo de solución/Concentración de la solución	-				
- presión de funcionamiento máx.	MPa (bar)	0,3 (3)			
- temperatura mín. de entrada calor de solución salina	°C	-10			
- temperatura máx. de entrada calor de solución salina	°C	20			
- Volumen del circuito de la fuente de calor en la bomba de calor	l	6,2	8,6	10,0	12,4
- Corriente de volumen nominal ΔT 3K	m ³ /h	5,3	7,1	9,1	11,0
- Pérdida de presión en la corriente de volumen nominal ΔT 3K	kPa (mbar)	36,0 (360)	32,0 (320)	51,0 (510)	39,0 (390)
- Consumo de potencia eléctrica/Potencia de referencia bomba de solución salina	W	200	200	400	400

Figura 34: Especificaciones técnica de BCG Valliant modelo VWS 220/2 y otras [66].

E.2. CAUDAL ESTIMADO

Tabla 14: Caudal estimado por día para los meses del año, según demanda térmica para horarios de uso del edificio.

Mes	Caudal [$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$]
Enero	0
Febrero	0
Marzo	2,39
Abril	5,97
Mayo	7,32
Junio	10,01
Julio	9,77
Agosto	9,34
Septiembre	8,03
Octubre	3,74
Noviembre	2,54
Diciembre	1,86

E.3. MODELO CON TEMPERATURA MÁXIMA

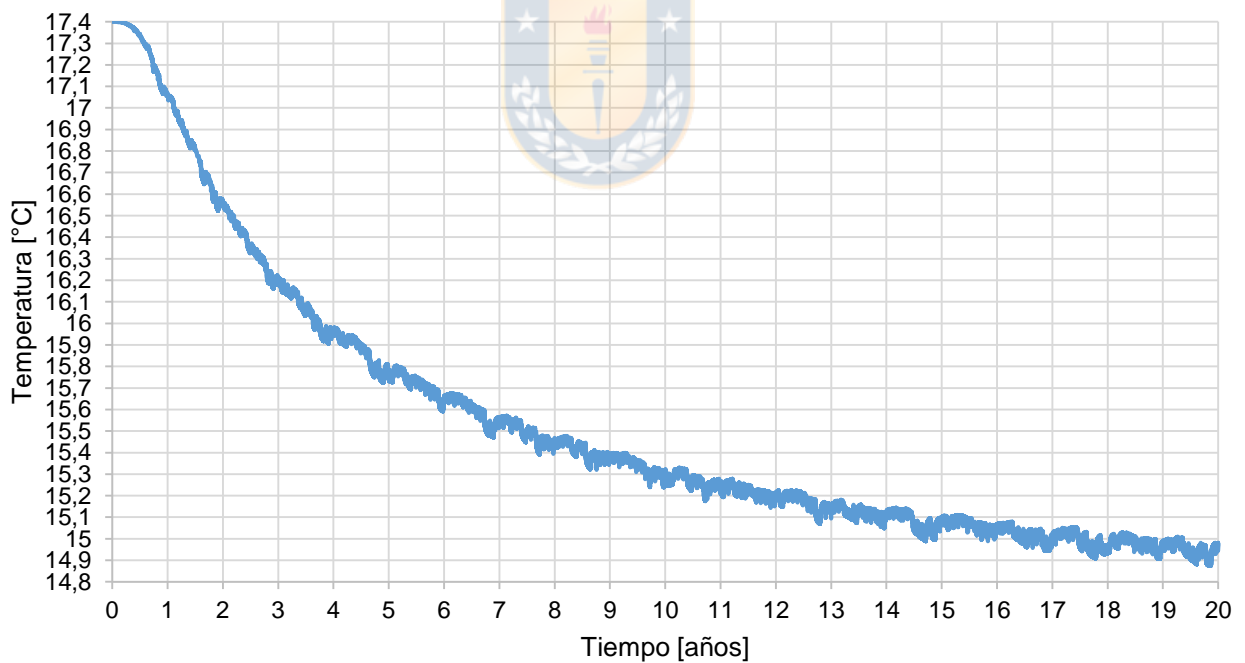


Figura 35: Variación de temperatura en el pozo de captación en 20 años para caso de temperatura máxima (17,4 °C).


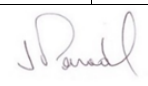
Anexo F. EVALUACIÓN ECONÓMICA

F.1. MODELO CON TEMPERATURA MÁXIMA

Tabla 15: Consumos energéticos anuales para caso 1, 2 y 3.

Casos	Elemento	Consumo eléctrico anual neto [kW]	Consumo gas licuado anual neto [kW]	Consumo pellet neto [kW]
1	Circuladoras sistema distribución	116,93	-	-
	Bomba de calor	3.324,68	-	-
	Caldera gas licuado	80,25	12.921,69	-
	Caldera pellet	-	-	13773,67
2	Circuladoras sistema distribución	330,48	-	-
	Bomba de calor	8.634,21	-	-
	Caldera gas licuado	226,80	33.201,65	-
	Caldera pellet	-	-	35390,77
3	Circuladoras sistema distribución	116,93	-	-
	Bomba de calor	3.181,23	-	-
	Caldera gas licuado	80,25	12.921,69	-
	Caldera pellet	-	-	13773,67

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para sala cuna y jardín infantil en Talcahuano - Región del Biobío		
Nombre Memorista: Ahirton Cristóbal Agustín Lara Sepúlveda		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Muy Bueno	 Prof. Ramón Díaz N.
Calificación	6.8	
Fecha	01-04-2021	
 Prof. FERNANDO PARADA		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Fernando Betancourt C.		Prof. Roberto Gómez E.
Resumen		
<p>El presente estudio realiza una introducción a la energía geotérmica y sus potenciales como recurso energético, enfocándose en los principios de uso y modelamiento de una captación geotérmica de muy baja entalpía con bomba de calor geotérmica para fines de climatización.</p> <p>El estudio será realizado en un edificio público el cual será utilizado como sala cuna y jardín infantil presente en la comuna de Talcahuano, donde se identificarán parámetros hidrogeológicos, ambientales y estructurales del edificio que permitan describir y caracterizar el comportamiento del sistema geotérmico para fines de climatización. Con estos datos se procederá a aplicar la teoría de cálculo propuesta para el diseño del sistema de climatización por geotermia que consiste en el cálculo de demanda energética del edificio, el diseño la captación térmica a través de la modelación numérica y analítica y el análisis de prefactibilidad para definir la viabilidad del proyecto.</p> <p>Los resultados obtenidos concluyen que el sistema geotérmico abierto con potencia térmica de 20,3 kW es técnicamente viable y genera ahorros en un periodo de 4 a 20 años en comparación a un sistema de calefacción convencional con gas licuado para el caso de estudio. También se concluye los modelos analíticos como numérico permiten definir un diseño de captación que idealmente debiesen ser validado con datos reales medidos in-situ.</p>		