

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE CLIMATIZACIÓN GEOTÉRMICA PARA EL NUEVO EDIFICIO DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

Proyecto de título presentado en conformidad a los requisitos para optar al Título de
Ingeniero Civil.

PAULA LORETO ZAPATA PINO

CONCEPCIÓN, ENERO DE 2018

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| INDICE DE CONTENIDO | 2 |
| 1: INTRODUCCIÓN | 7 |
| Contexto | 7 |
| Guía de lectura | 8 |
| Objetivos | 9 |
| 2: PERFIL ENERGETICO DEL EDIFICIO | 9 |
| 2.1 Identificación de Zona de Análisis | 10 |
| 2.1.1 Localización | 10 |
| 2.1.2 Entorno | 11 |
| 2.1.3 Edificio | 11 |
| 2.2 Estudio Energético del edificio | 13 |
| 2.2.1 Software de Simulación Energética: TRNSYS | 13 |
| 2.2.2 Confort térmico en la edificación | 17 |
| 2.2.3 Analisis de Perdidas de energía | 17 |
| 2.2.4 Análisis de Ganancias de Energía | 19 |
| CAPITULO 3: MARCO METODOLÓGICO DE DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE UN SISTEMA GEOTERMICO DE BAJA ENTALPIA | 21 |
| 3.1 Literatura de Diseño de Sistemas Geotérmicos de Baja Temperatura | 21 |
| 3.1.1 Intercambiador de Calor | 22 |
| 3.1.2 Bomba de Calor | 23 |
| 3.1.3 Sistema de distribución de calor..... | 29 |
| 3.2 Datos mínimos de diseño de un intercambiador de calor de circuito cerrado vertical | 29 |
| 3.2 .1 Datos energéticos del edificio | 29 |
| 3.2.2 Caracterización del terreno..... | 30 |
| 3.3 Procedimiento de diseño de un intercambiador de calor vertical cerrado | 32 |
| 3.3.1 Elección de la bomba de calor..... | 32 |
| 3.3.2 Selección de parámetros y desarrollo de la simulación..... | 34 |
| 4: PROPUESTA DE DISEÑO TENICA Y ECONÓMICA DEL INTERCAMBIADOR GEOTERMICO CERRADO VERTICAL | 37 |
| 4.1 Propuesta de Diseño | 37 |
| 4.2 Tiempo de operación | 38 |
| 4.3 Propuesta de diseño final | 40 |

| | |
|---|----|
| 4.4 Análisis económico del diseño final | 41 |
| 4.4.1 Inversión | 42 |
| 5: CONCLUSIONES | 43 |
| 6: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 45 |
| ANEXOS | 46 |
| Anexo A: “Calculo de demanda energética del edificio” | 46 |
| Anexo B: “Dimensionamiento del intercambiador de calor” | 53 |
| 1. Propiedades del terreno | 53 |
| 2. Agujero de perforación para el tipo de intercambiador de calor | 54 |
| 3. Fluido del transportador de calor | 55 |
| 4. Entrada de datos de carga base | 56 |
| 5. Entrada de datos de carga máxima | 57 |
| 6. Resultados de salida | 58 |

INDICE DE CONTENIDO 1

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Parámetros, hidrogeológicos, geotécnicos y geológicos (Elaboración propia) | 34 |
| Tabla 2: Valores de las temperaturas de diseño (Elaboración propia) | 36 |
| Tabla 3: Principales costos de inversión del sistema (Elaboración propia) | 40 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Plano general del futuro Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Fuente Google Earth) | 10 |
| Figura 2: Planta primer y segundo nivel y segundo nivel, del Edificio del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Fuente proyecto de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental) | 12 |
| Figura 3: Transmisión de calor en edificios (Fuente Arquitectura&energía) | 15 |
| Figura 4: Diferencias de presiones producidas por el viento (UBB,2000) | 18 |
| Figura 5: Vías donde comúnmente se producen las infiltraciones en edificios..... (Fuente UBB, 2000) | 18 |
| Figura 6: Cargas térmicas del edificio (Fuente Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos) | 20 |
| Figura7: Configuraciones básicas de intercambiadores de calor enterrados (Fuente Guía de | |

| | | |
|---|----|--------|
| la energía geotérmica, España) | 22 | Figura |
| 8: Funcionamiento bomba de calor (Dimplex, 2005) | 23 | |
| Figura 9: Diagrama de Mollier para el agua el líquido en estado de compresión caso 1 ... | 25 | |
| (Fuente Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, 2010)..... | 25 | |
| Figura 10: Diagrama de Mollier para el líquido en estado de compresión caso 2 (Fuente | | |
| Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, 2010) | 26 | |
| Figura 11: Diagrama de flujo de una bomba de calor geotérmica (Elaboración propia) | 26 | |
| Figura 12: Diagrama de fase de una bomba de calor geotérmica (Elaboración propia) | 28 | |
| Figura 13: Curva de demanda térmica del edificio del Departamento de Ingeniería Civil y | | |
| Ambiental (Elaboración propia) | 30 | |
| Figura 14: Ubicación prospecciones estudio mecánica de suelos, edificio del Departamento de | | |
| Ingeniería Civil y Ambiental (Proyecto de ingeniería del edificio del Departamento de | | |
| Ingeniería Civil y Ambiental) | 31 | |
| Figura15: Curva de rendimiento de calefacción para bomba de calor Dimplex, modelo SI | | |
| 130TUR+ (Fuente Dimplex) | 32 | |
| Figura 16: Curva de Rendimiento de refrigeración para bomba de calor Dimplex, modelo SI | | |
| 130TUR+ (Fuente Dimplex) | 33 | |
| Figura 17: Histograma de temperaturas anuales de la ciudad de Concepción en base a datos a | | |
| datos de estación Carriel Sur Internacional, 2013 (Elaboración propia) | 39 | |
| Figura 18: Propuesta de diseño final (Elaboración propia) | 40 | |
| Figura 19: Temperaturas del fluido en el intercambiador de calor diseñado, para una vida | | |
| útil de veinte años (Fuente (EED, 2017)) | 41 | |
| Figura20: Amortización del aprovechamiento geotérmico (Fuente (REHAU, 2013)) | 43 | |

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE CLIMATIZACIÓN

GEOTÉRMICA PARA EL NUEVO EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DEL BIOBÍO

Autor: Paula Loreto Zapata Pino.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BioBío

Correo electrónico: pauzapap@gmail.com

Profesor patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BioBío Correo

electrónico: pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra .Al encontrarse presente en todo el planeta, cada país puede producir su propia fuente de energía, evitando la “dependencia energética.

Esta investigación se llevó a cabo en conjunto con la empresa Ingeniería y asesorías LIEM Ltda. y consiste en el desarrollo de un sistema de climatización geotérmica para el Edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, a través de la realización del diseño de un sistema geotérmico vertical cerrado de baja entalpía. Esto con el objetivo de iniciar un proceso de formación y transferencia tecnológica en el área, aportando una solución al desafío global del cambio climático. Recordemos que Chile, se ha comprometido al 2030 a reducir sus emisiones de CO2 en un 30% con respecto al 2007.

Palabras claves: Eficiencia energética, Intercambiador Geotérmico, Bomba de calor

Nº de palabras: 6978+ 18figuras/tablas*250=11478

VIABILITY STUDY OF A GEOTHERMAL CLIMATE CONTROL PROJECT FOR THE NEW BUILDING OF THE CIVIL ENGINEERING PROGRAM OF THE UNIVERSIDAD DEL BIOBÍO

Author: Paula Loreto Zapata Pino

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del BioBío

E-mail: pauzapap@gmail.com

Sponsoring teacher: Dr. Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del BioBío

E-mail: pcisterna@ubiobio.cl

SUMMARY

Geothermal energy is energy stored in the form of heat below the solid surface of the Earth. Due to the fact that it is found throughout the earth, each country can produce its own source of energy, avoiding "energy dependence".

This research together with the company Ingeniería y asesorías LIEM Ltda. Consists of the development of a geothermal air conditioning system for the Building of the Department of Civil and Environmental Engineering through the realization of the design of a closed vertical geothermal system with low enthalpy.. The aim of doing this is to start a process of

technological design, creation and transfer in the area, providing a solution to the global challenge of climate change.

Recall that Chile, has committed to reduce its CO₂ emissions up to 30% compared to 2007, by the year 2030.

Keywords: Energy Efficiency, Geothermal Exchanger, Heat Pump

1: INTRODUCCIÓN

Contexto

En los últimos años la contaminación y el cambio climático se han convertido en una de las principales preocupaciones de la población mundial, es por eso cada vez se ha tomado más conciencia de que se deben encontrar soluciones para no hacer más daño al medio ambiente. Ahí es donde uso de energías renovables, nace como un desafío relevante para la ingeniería moderna, con el propósito de contribuir al desarrollo sustentable Chile.

Se definirá la energía geotérmica de baja temperatura como el calor, a baja temperatura, almacenado a poca profundidad en suelos, rocas o aguas subterráneas (VDI, Verein Deutcher Ingenieure, 2001). Sin embargo el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales, o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo, se logra entregar el calor de forma concentrada, siendo posible su aprovechamiento.

Los sistemas geotérmicos de baja entalpía aprovechan la energía interna y la inercia térmica de la tierra, donde aproximadamente entre los diez y veinte metros de profundidad la temperatura del suelo mantiene un equilibrio pese a la oscilación térmica diaria y estacional, de ahí aumenta aproximadamente 3°C cada 100 m de profundidad (VDI, Verein Deutcher Ingenieure, 2010) .

Teniendo conocimiento que este recurso se encuentra en la totalidad de la corteza terrestre, más que investigar sobre la forma de localizar el recurso, sus líneas de investigación son cual es la forma de explotarlo para que, sin llegar a agotarlo, pueda satisfacer la demanda energética que se necesita para mantener el confort térmico en el interior de viviendas unifamiliares o edificios de pequeña o gran envergadura

En este contexto, los sistemas geotérmicos de baja temperatura, tiene múltiples ventajas para alcanzar este objetivo en comparación con los actuales sistemas de climatización, ya que es una energía renovable, que posee un bajo costo de mantención, la cual se encuentra disponible durante todo el año y con un alto potencial de aprovechamiento, ya que la encontramos prácticamente en la totalidad de la corteza terrestre. A su vez, con el uso de la energía geotérmica se reduce en un 70% la emisión de CO₂, en algunos casos, y en un 75% el consumo de energía en climatización de edificios, en comparación con los actuales sistemas de climatización, características positivas dentro del desarrollo de la ingeniería sustentable.

La inercia térmica es la base de los sistemas geotérmicos de baja entalpía que usan como medio de captación sistemas de intercambio de calor con el suelo, destacando en este trabajo los intercambiadores verticales cerrados (*borehole*). Para hacer uso del calor extraído es necesario integrar el sistema con una bomba de calor, que actuará como intermediaria entre el sistema de intercambio de calor y el sistema de distribución interno de la vivienda, aportando el complemento de energía necesario para acondicionar térmicamente el hogar.

Los costos iniciales de construcción los sistemas geotérmicos son en algunos casos de un 80% del costo total del proyecto, ya que para perforar el suelo se necesita de maquinaria específica y con costos elevados, por lo tanto este aspecto es una de las barreras de entrada importante para la construcción de estos sistemas (Vielma Sossa, 2013).

Guía de lectura

Esta memoria consta de cuatro capítulos. El primero es entregar antecedentes generales del proyecto y se informan los objetivos de este trabajo. En el segundo se realiza una evaluación del comportamiento energético del edificio con el software Trnsys. En el capítulo tres se

presenta el desarrollo metodológico y se definirá la propuesta de diseño del sistema de intercambio geotérmico para climatizar el edificio en cuestión. En el capítulo cuatro se abordará la propuesta de diseño técnica y económica de la investigación. En el último capítulo se incluyen las conclusiones y futuras investigaciones. Luego se incluye la bibliografía y finalmente una sección de anexos de la memoria.

Objetivos

Objetivo general: Evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar un sistema geotérmico de baja entalpía, orientado a la generación de climatización del nuevo edificio del Departamento de Ingeniería Civil Ambiental ubicado en el campus Concepción de la Universidad del BíoBío.

Objetivos específicos:

- Evaluar la demanda térmica del Edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Realizar el diseño del intercambiador de calor.
- Realizar un análisis económico del sistema geotérmico.

2: PERFIL ENERGETICO DEL EDIFICIO

El objetivo de este estudio es tener el consumo energético del edificio, para así poder analizar los posibles factores que afectan este consumo y las posibilidades de ahorro realizando ciertos cambios o labores de mantenimiento una vez que se compruebe la viabilidad técnica y económica de esta. Además conseguir que un edificio sea eficiente no solo repercute en un

ahorro de energía, de emisiones de CO2 y económico, sino que también mejora la sensación de confort y calidad que tienen los usuarios dentro de los edificios.

2.1 Identificación de Zona de Análisis

2.1.1 Localización

El nuevo edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental ubicado en el campus de la Universidad del Bio-Bio, en la ciudad de Concepción, figura 1. Es un edificio con un volumen principal de dos pisos y un segundo volumen de un piso ambos con subterráneo, que considera oficinas para docentes, salas de reuniones y trabajo colaborativo y salas para el alumnado.



Figura 1: Plano general del futuro Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Fuente Google Earth)

El futuro edificio de Ingeniería Civil y Ambiental ubicado en el campus Concepción de la Universidad del Bío Bío.

Por el hecho de estar en el Valle de la Mocha entre las planicies litorales y la Cordillera de la Costa, cabe reseñar ciertos aspectos a colación del clima de esta zona geográfica, que se estudiarán a continuación.

2.1.2 Entorno

El clima es oceánico con abundancia de lluvias, según la clasificación climática de Köppen es un Csb. Su temperatura promedio anual es de 12,7 °C, mientras que la promedio en verano es de 17 °C y en invierno de 8 °C.

Las oscilaciones térmicas son moderadas si consideramos su latitud, esto debido a su cercanía al Océano Pacífico. Los veranos son templados y los inviernos suaves. Las precipitaciones se concentran en los meses más fríos, siendo el período de mayo a agosto el que concentra la mayor parte de la lluvia. Por el contrario el verano es seco. Durante el año caen 1.110 mm promedio.

2.1.3 Edificio

El edificio del Departamento Ingeniería Civil y ambiental es un edificio pensado para una alta intensidad académica a lo largo del año. Se consideran 1308.8 m^2 de edificación total de los cuales se dejaron habilitados 820 m^2 en la figura 2 se precia un plano de planta del edificio.

Su actividad lectiva se mantiene de lunes a viernes, a excepción de una dependencia destinada a los alumnos, que estará funcionando de lunes a sábado.

El edificio supone por tanto uno de los enclaves más importantes para la actividad docente y lugar de estudio para el alumnado.

Durante la semana, alrededor de 400 alumnos circulan por el edificio, desde las 8:00 de la mañana hasta las 20:00 de la tarde. Este trasiego de gente afectará a la simulación en la medida en que el flujo de gente provoque la apertura de puertas y ventanas que generen renovaciones de aire en las zonas a climatizar.

A su vez, el número de personas presentes en una habitación también condiciona el cálculo del aporte calorífico necesario para alcanzar nuestra temperatura de consigna, puesto que, dependiendo del trabajo que se esté realizando, el rango de edad y el peso de los ocupantes,

los mismos funcionarán como aportadores de calor al ambiente. Este dato se obtendrá de forma estadística, a través de la media de edad y peso de los alumnos.

Sin embargo, el mayor factor a tener en cuenta es el de las características de los cerramientos que constituyen el edificio. El uso de los aislantes adecuados tanto en las paredes adjuntas como en las exteriores, así como en las cubiertas y fachadas, marca la diferencia en lo referente al aporte de calor necesario para mantener el edificio dentro de los valores consigna.



Figura 2: Planta primer y segundo nivel y segundo nivel, del Edificio del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Fuente proyecto de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental)

2.2 Estudio Energético del edificio

El consumo de energía no deja de ser un tema preocupante a la hora de planear el diseño de un edificio. Existen estrategias que permiten reducir esos consumos y además hacer un valioso aporte al confort y al medio ambiente.

El desempeño energético de un edificio es un elemento crítico en el diseño de construcciones sostenibles. Hay muchas estrategias de conservación de energía que permiten optimizar tal desempeño, entonces, el saber elegir cuales de éstas proporcionan mayores beneficios, es un paso fundamental en el proceso de diseño de un proyecto. La simulación energética de edificios responde a estas necesidades, sin embargo, su utilidad y aplicación requiere de un completo conocimiento de sus características.

La eficiencia energética de una construcción depende de su diseño, forma, orientación, materiales y métodos de construcción, envolvente, manejo del agua, al igual que la calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire y sistemas de iluminación, determinan el nivel de eficiencia con que la edificación usa energía. Por lo cual, la forma más efectiva de optimizar el consumo energético es usando un enfoque integral en el que se vea la edificación como un conjunto total e interconectado.

Al considerar el perfil energético del edificio para el diseño de un intercambiador geotérmico hay que tener en cuenta tanto las cargas de diseño o potencia máxima (*peak load*) como la demanda de energía del edificio.

Este estudio se realizó a través del software TRNSYS. En el anexo A se encuentra el desarrollo de esta simulación.

2.2.1 Software de Simulación Energética: TRNSYS

Software de simulación de demanda energética en edificaciones. Existen dos módulos que se ocuparan para modelar la demanda energética del edificio y así tener la cantidad óptima de energía que se debe cubrir con geotermia.

Cabe destacar que la base del funcionamiento de Trnsys es a través del estudio de transferencia de calor. Al estudiarse estas se podrán obtener resultados como las pérdidas de calor por la pared o las ventanas de la casa, la influencia de la radiación solar, etc. A

continuación se nombraran los distintos modos de transferencia de calor a través de sus ecuaciones.

- *Conducción:* Este caso se ve reflejado en el tipo de material ocupado en la construcción, determinando la transferencia de energía entre el entorno y el edificio.

$$q'' = -K \frac{dT}{dX} \quad (\text{Ec. 1})$$

$\frac{dT}{dX}$: Flujo de calor transferido en la dirección x , proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección .

K : Conductividad termica

- *Convección:* Al ser la transferencia de calor en gases y líquidos, esta puede identificarse en el cerrar y abrir de puertas en el edificio.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec. 2})$$

$(T_s - T_\infty)$: Diferencia entre la temperatura de las superficies h :
Coeficiente de convección

- *Radiación:* Esta se experimenta a través de la radiación solar que se ejerce sobre el edificio, esta dependerá de la orientación de las ventanas principalmente.

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{Ec. 3})$$

ε : Propiedad de la superficie denominada emisividad

σ : Constante de Stefan Boltzaman, $5,67 * 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2} * K\right)$

T_s^4 : Temperatura absoluta del cuerpo

- *Coeficiente global de transferencia de calor:* Para cada una de las capas del edificio existirá un coeficiente de calor, ya sea muros, suelo, techo, ventanas y puertas.

$$q_x = UA\Delta T \text{ (c. 4)}$$

ΔT : Diferencia entre temperatura interior y exterior

$UA : \frac{1}{R_{Total}}$; R_{Total} : Resistencias térmicas materiales

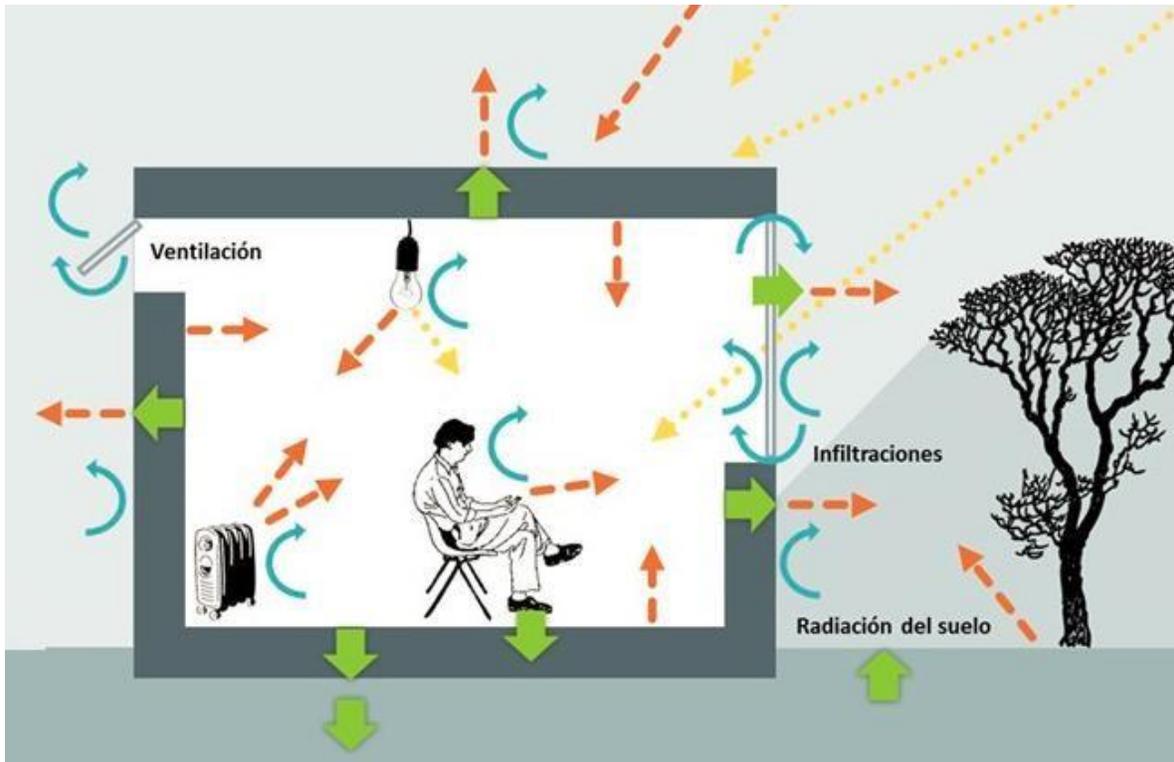


Figura 3: Transmisión de calor en edificios (Fuente Arquitectura&energía)

El desarrollo de este proyecto se realizó en dos fases. La primera fue construir el modelo del edificio en Trnsys Build, para luego ejecutar con Trnsys Studio la modelación térmica de este.

a) *Trnsys Build*

Supone el motor sobre el cual se asienta la configuración de los parámetros correspondientes a la configuración de las distintas zonas térmicas. Se definirá el edificio como un conjunto de zonas ,todas ellas cerradas y adyacentes según corresponda.

Una vez diseñado las diferentes zonas térmicas es necesario para su posterior, definir las condiciones de los cerramientos que componen cada una de ellas, es decir losas, muros, ventanas, puertas y techumbres. Para esto, se definieron los elementos y materiales que componen a estos, con sus respectivos espesores y propiedades térmicas la configuración de los componentes materiales de cada superficie de cada zona térmica es el proceso obligatorio para que una simulación funcione correctamente durante la simulación, ya que es el único parámetro que no es controlable desde el entorno de trabajo de Simulation Studio.

La configuración de los parámetros que condicionan la temperatura de las distintas zonas térmicas es deban ser editadas zona por zona, siendo equivalentes en funcionamiento, pero variando la naturaleza de los valores clave que habrán de ser introducidos por el usuario para definir los siguientes parámetros.

- Infiltración
- Ventilación
- Calefacción
- Refrigeración
- Confort
- Ganancias

b) *Trnsys Studio*

Simulation Studio supone el entorno de programación de TRNSYS. Sobre él se asientan todas las funciones del programa.

Una vez ingresado el archivo en el programa aparecerán una serie de elementos que están interconectados entre sí y también están conectados al edificio. Un archivo meteorológico, el cual posee información procedente de la zona, un elemento que funciona como un controlador diferencial de la luz, así como una serie de “outputs” que nos darán los resultados de irradiación y temperaturas del edificio.

2.2.2 Confort térmico en la edificación

El confort térmico corresponde a la capacidad de la vivienda de ofrecer a sus moradores comodidad con respecto al ambiente térmico que les rodea.

Se considera en la investigación el consumo real de energía que se debe aportar para generar la temperatura de confort dentro de las viviendas de 19 °C de forma permanente, para obtener la calefacción de la edificación

2.2.3 Analisis de Perdidas de energía

Se definieron a las infiltraciones como la mayor fuente de perdida de energía. Se definen como intercambios de aire no controlados a través de grietas ocultas y juntas de unión no selladas, que ocurren por diferencia de presiones que inducen el flujo a través de las grietas.

Las recomendaciones de diseño internacionales respecto a la hermeticidad de aire de los edificios apuntan hoy a construir edificios con el mayor grado de hermeticidad. La preocupación de la hermeticidad debe partir en la etapa de diseño, definiendo las exigencias o criterios de desempeño para la hermeticidad de la construcción, conceptualizando una barrera de aire en la envolvente e identificando sus puntos críticos y, finalmente, verificar que estos detalles se ejecuten apropiadamente en la fase de construcción (UBB, Manual de hermeticidad al aire en edificaciones, 2000)

Los documentos ordenadores de la edificación de la mayoría de los países desarrollados establecen exigencias para la hermeticidad de edificios, exigiendo la hermeticidad suficiente para alcanzar el bienestar térmico. En la figura 4 y 5 se presentan las vías más comunes de infiltración, producidas la mayoría por el viento.

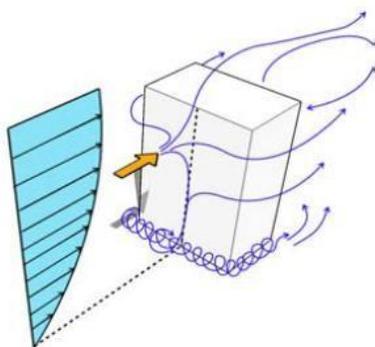


Figura 4: Diferencias de presiones producidas por el viento (UBB,2000)

Vías de ocurrencia de infiltraciones

1. Ventanas o puertas poco estancas
2. Rendijas alrededor de las ventanas
3. Vías a través de espacios en el pavimento/cielo hacia el interior del muro y luego hacia el exterior
4. Rendijas en la unión cielo-muro a altura del alero
5. Perforaciones a través del cielo para el paso de instalaciones
6. Ductos de ventilación que atraviesan el cielo/techumbre
7. Aireador inserto en el muro o extractor de baños
8. Rendijas alrededor de las instalaciones de alcantarillado en baños
9. Rendijas alrededor de la unión muro-pavimento
10. Espacios en y alrededor de instalaciones eléctricas

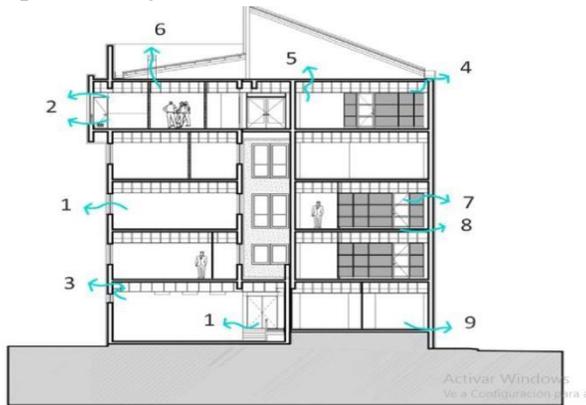


Figura 5: Vías donde comúnmente se producen las infiltraciones en edificios

(Fuente UBB, 2000)

2.2.4 Análisis de Ganancias de Energía

Las ganancias caloríficas pueden ir desde la presencia de luz artificial, número de personas que ocupan la zona en cuestión, existencia de equipos informáticos en funcionamiento, la luz solar, factores de forma, orientación del edificio, etc.

2.2.4.1 Clima y arquitectura

La relación entre el clima y la arquitectura es un aspecto clave al momento de realizar un diseño arquitectónico, pues la obra puede verse afectada como beneficiada. Los principales factores dependientes del clima en que se emplaza un edificio y que afecta el bienestar de los ocupantes son la temperatura, humedad, radiación solar, vientos nubosidad y pluviometría.

El edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, obtiene ganancias solares debido a que su mayor superficie de ventanas se encuentran dispuestas hacia el recorrido del sol, orientación norte y sur.

2.2.4.2 Diseño de la envolvente

La envolvente de una edificación tiene una vital importancia ya que genera la mediación entre el espacio interior, que busca ser confortable para sus ocupantes, y el clima exterior. El primer principio para lograr un diseño eficiente es generar una aislación térmica lo más inteligente posible, logrando el objetivo de minimizar las pérdidas de calor por conducción. El segundo principio esencial consiste en sellar la envolvente al paso del aire, evitando de este modo las pérdidas de calor por infiltración.

El edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental no genera altas ganancias por su envolvente, ya que al realizar el estudio energético se evidencia una gran demanda sobre todo de calefacción, por lo que se evidencia que en los meses de invierno, la fachada no está logrando ser muy eficiente.

2.3.4.3 Estrategia de calentamiento pasivo

En ciudades como Concepción se recomienda considerar la utilización de estrategias de calentamiento pasivo, en particular la captación solar, siempre que el uso de edificio no genere demasiadas ganancias internas y utilizando estrategias para evitar sobrecalentamiento en verano (UBB, Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos, 2012).

La estrategia consiste en las épocas de invierno aprovechar aquellas ventajas del clima en esta época, en particular el asoleamiento, y además protegerse de las desventajas, en particular de las bajas temperaturas.

En el edificio de Ingeniería Civil, existen altas cargas de calor internas, generadas por equipos, iluminación y ocupantes. Al evaluar las ganancias internas obtenidas por el edificios aprecia que no existe un eficiente aprovechamiento de estas, debido a que por ejemplo laboratorios como el de computación el cual posee una alta ganancia energética, posee muros dobles que estarían conservando el calor dentro de un mismo espacio, pero no lo estarán distribuyendo.

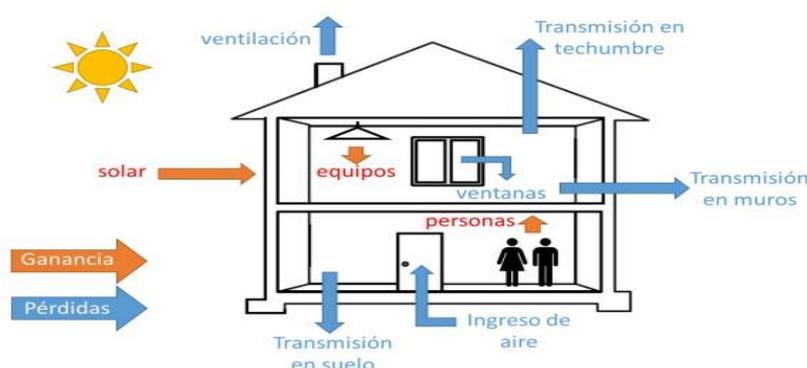


Figura 6: Cargas térmicas del edificio (UBB,2000)

CAPITULO 3: MARCO METODOLÓGICO DE DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE UN SISTEMA GEOTERMICO DE BAJA ENTALPIA

En el siguiente capítulo se describirá la metodología para realizar el diseño de un intercambiador cerrado vertical de baja temperatura para producción de calefacción y refrigeración. Se describieron los componentes de este sistema y las bases del estudio. Se realizaron los cálculos y supuestos necesarios para obtener los parámetros para realizar el diseño del sistema geotérmico de baja temperatura.

3.1 Literatura de Diseño de Sistemas Geotérmicos de Baja Temperatura

En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del sub suelo para la climatización de casas individuales o edificios de mayor envergadura por medio de bombas de calor geotérmicas. Esta energía es captada del subsuelo a través del intercambiador de calor vertical cerrado, haciendo circular un fluido a través de tubos insertos a grandes profundidades. Luego actúa la bomba de calor geotérmica que es la encargada de circular el fluido por intercambiador de calor, a través de la bomba de circulación que esta posee, y además de elevar la energía proveniente del subsuelo, por medio de la bomba de calor, y entregar la energía suficiente al circuito de distribución de calor, para producir el confort térmico del edificio. Por lo tanto, el sistema geotérmico de baja temperatura se divide en tres elementos fundamentales:

- Circuito Intercambiador de calor geotérmico □
Bomba de calor.
- Sistema de distribución de calor.

3.1.1 Intercambiador de Calor

Existen diversos sistemas de intercambio de calor. En primer lugar cabe distinguir entre los sistemas de circuito abierto y los sistemas de circuito cerrado. Este proyecto se realizará con circuito cerrado. En estos circuitos un fluido caloportador dentro de una tubería el que realiza el intercambio, generalmente con el suelo aunque también se puede realizar con una masa de agua.; estas instalaciones, denominadas intercambiador de calor enterrado, pueden ser horizontales o verticales, como se muestra en la figura 7.

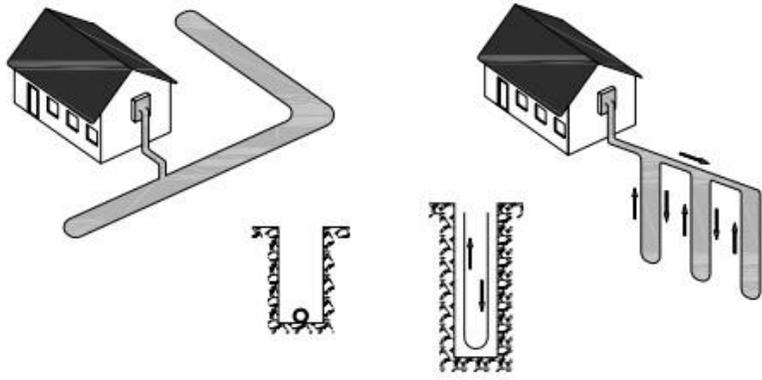


Figura7: Configuraciones básicas de intercambiadores de calor enterrados (Fuente Guía de la energía geotérmica, España)

La selección de un intercambiador de calor horizontal o vertical dependerá de la superficie de terreno disponible, la potencia a disipar y los costes de instalación. Generalmente los sistemas horizontales se emplean para instalaciones de baja potencia con grandes superficies disponibles, mientras que los sistemas verticales permiten la ejecución de grandes instalaciones con una perfecta integración en la edificación y sin hipotecar grandes superficies de terreno. Existe una variante de la configuración horizontal (denominada slinky) que se emplea para instalar la mayor longitud de intercambiador con la menor excavación posible y consiste en enrollar la tubería en forma de espiras. Los sistemas horizontales son más sensibles a las variaciones estacionales como cambios en la temperatura exterior y variación de las condiciones hidrogeológicas (nivel freático), por lo que su rendimiento energético es menor. La aplicación comercial de los sistemas verticales es mayor porque permiten instalaciones de elevada potencia en relativamente poco espacio. Por este motivo, se decidió que el intercambiador de calor enterrado de la planta del edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental fuera vertical.

3.1.2 Bomba de Calor

Es el dispositivo o instalación que transfiere calor del entorno natural, en este caso de la tierra, al edificio invirtiendo el flujo natural de calor, de forma que fluya de una temperatura menor a una más alta.

Las bombas de calor son la base de los sistemas geotérmicos para climatizar edificios, las bombas de calor que integran estos sistemas funcionan en seis pasos, detallados a continuación (Energylab, 2011).

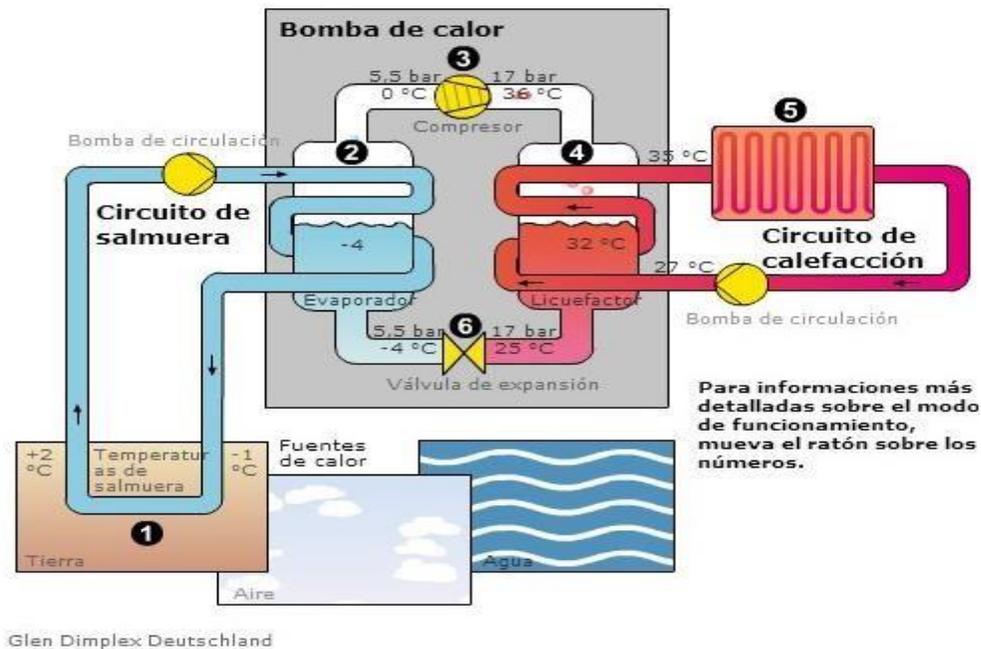


Figura 8: Funcionamiento bomba de calor (Dimplex, 2005)

- Reservorio térmico a través del uso de agua subterránea en circuito abierto o de intercambiador cerrado vertical (1). Para el desarrollo de este proyecto se tendrá un circuito cerrado con agua que intercambiará calor con el pozo geotérmico.
- En el proceso de evaporación (2) el agua absorbe calor del circuito de intercambio de calor geotérmico para evaporarse, aumentando su entalpía.
- En el proceso de compresión (3) por medio de un compresor eléctrico, el gas aumenta su presión, aumentando su temperatura y consecuentemente su entalpía.
- En el proceso de condensación (4), el gas caliente y comprimido cede calor al circuito de calefacción (distribución) y se comienza a condensar, bajando su entalpía.
- En la distribución de calor en la edificación (5), que también se hace a través de un circuito cerrado, el fluido que recorre su interior absorbe calor elevando su

temperatura para posteriormente retomar con una temperatura menor realizando el intercambio de calor con el circuito de bomba de calor.

- En el proceso de expansión (6), el líquido a alta presión sufre una caída de presión. Su entalpía no cambia.
- Proceso inverso, enfriamiento (7), se retira el exceso de calor de las instalaciones en las épocas más calurosas y se envía al subsuelo.
- El fluido frío de las ondas de captación se utiliza a continuación para enfriar el fluido que circula por el condensador de la bomba de calor. El fluido se encuentra en fase de vapor de alta presión y alta temperatura a la entrada del condensador cede calor al fluido que las sondas de captación, de tal forma que se enfría y condensa.
- El fluido pasa a continuación por la válvula de expansión donde se baja la presión y esta pérdida lleva consigo a una baja de temperatura del fluido.
- El fluido frío pasa por el evaporador, donde enfría los circuitos del sistema de distribución, eliminando así el calor sobrante de las instalaciones que se desean refrigerar. En este paso el fluido se calienta y se evapora.
- El fluido entra al compresor, donde aumenta su presión y su temperatura.
- El calor retirado en el evaporador a baja temperatura, se elimina en el condensador, al entrar en contacto con el fluido que circula por la sonda geotérmica, cerrándose así el ciclo.

Las bombas de calor geotérmicas son eficientes porque utilizan energía que viene de la tierra, como también la necesaria para alimentar al compresor en un sistema cerrado donde casi no existen pérdidas de energía. Estas bombas de calor miden su eficiencia por medio del coeficiente de desempeño, COP: Relación entre la potencia/energía térmica entregada en el condensador y la potencia/energía eléctrica consumida en el compresor. Cabe destacar que eficiencia puede variar según la temperatura de trabajo, independiente de las eficiencias mecánicas y térmicas de los distintos componentes de las máquinas.

En la siguiente figura se explica el ciclo frigorífico de una bomba de calor, se observa la base física de la relación temperatura-prestaciones para una bomba de calor trabajando en modo calor.

En la primera gráfica se ve el aumento de entalpía del líquido en etapa de compresión [12], que corresponde al trabajo del compresor.

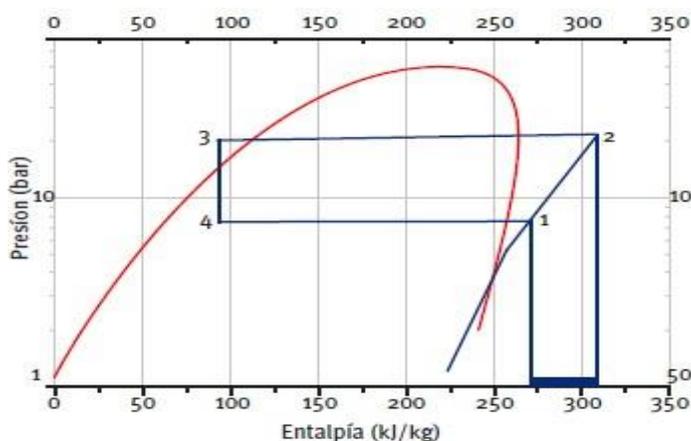


Figura 9: Diagrama de Mollier para el agua el líquido en estado de compresión caso 1 (Fuente Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, 2010)

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

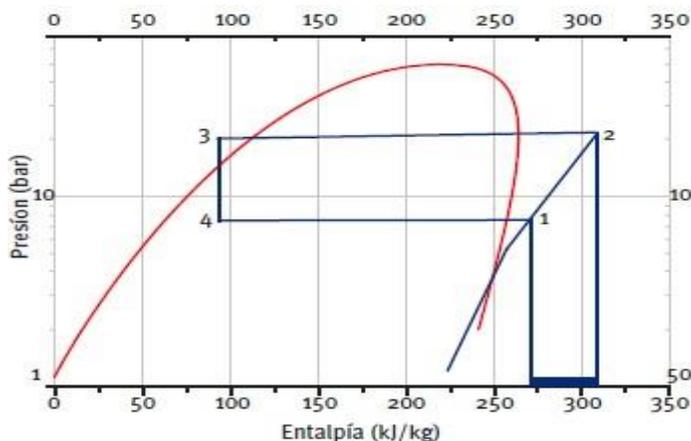


Figura 10: Diagrama de Mollier para el líquido en estado de compresión caso 2 (Fuente Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica, 2010)

La bomba de calor al igual que en las máquinas frigoríficas el ciclo que más emplea es el de compresión de vapor. Teniendo en cuenta esto, el equipo para este proyecto debe ser reversible, producir frío y calor dentro del edificio. Para conseguir esto solo fue necesario añadir una válvula inversora de cuatro vías.

A continuación se presenta el diagrama de flujo y diagrama de fase de una bomba de calor geotérmica, funcionando en el ciclo de refrigeración.

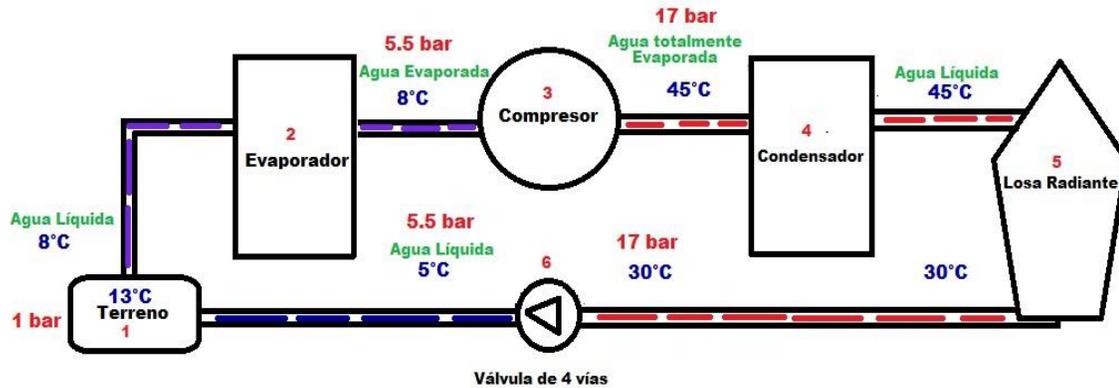


Figura 11: Diagrama de flujo de una bomba de calor geotérmica (Elaboración propia)

□ Balance térmico global de un intercambiador de calor

$$Q = C_h (T_1 - T_2) = C_c (t_2 - t_1) \quad (\text{Ec. 5})$$

Q : Calor transferido entre ambos flujos

C_h y C_c : Calor específico del fluido ($J/gr^\circ C$)

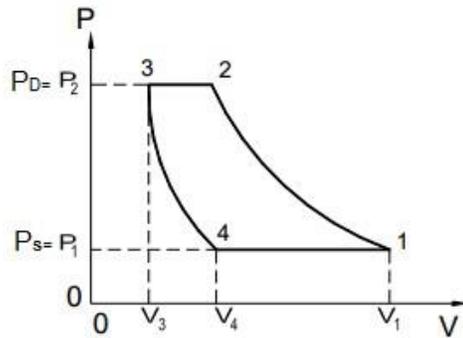
1 y 2: Entrada y salida del intercambiador

T y t : Caliente y frío

$$Q = 2.32 (13 - 8) = 4.186(8 - 5)$$

$$Q \cong 12 J$$

□ *Ciclo de compresión*



P_D : Presión de descarga

P_E : Presión de entrada

4 – 1: aspiración de gas, a la presión p_1 de entrada

ho gas

, a la presión p_2 de descarga

1 – 2: compresión de dic

2 – 3: expulsión del gas comprimido

3 – 4: caída brusca de la presión

Inmediatamente después de 3 – 4 se abre la válvula de admisión y recomienza el ciclo.

$$r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^n \quad (\text{Ec. 6})$$

r : Relación de compresión

n : exponente polintropic , varía entre 1.25 – 1.38

$$r = \frac{17}{5} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{1.25}$$

$$3.4 = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{1.25}$$

Relacion de volúmenes de succión y descarga luego de haber pasado por el compresor:

$$\triangleright 44.617V_3 = V_4$$

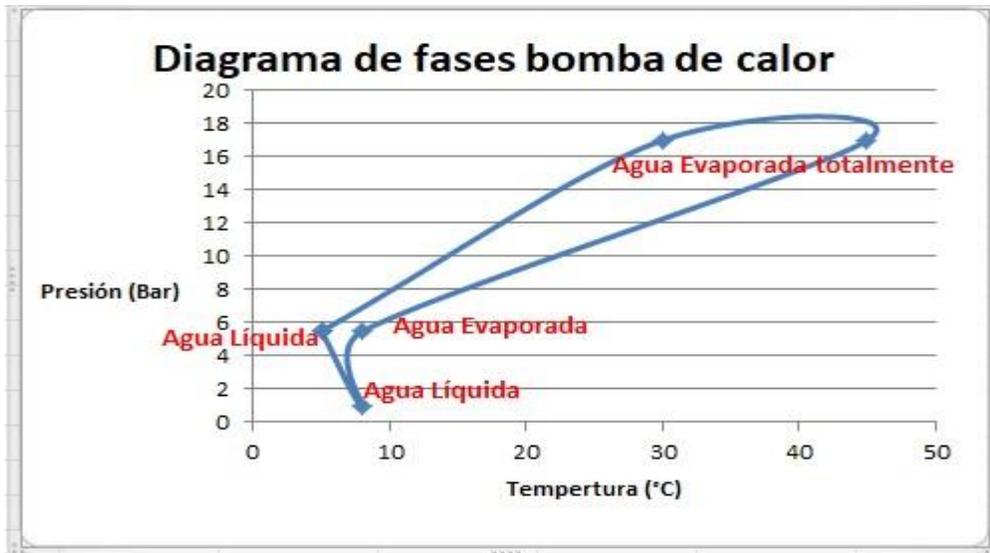


Figura 12: Diagrama de fase de una bomba de calor geotérmica (Elaboración propia)

3.1.3 Sistema de distribución de calor

Los sistemas de intercambio de calor en los sistemas de distribución son los encargados de entregar el calor desde la bomba de calor al edificio. Los sistemas de distribución pueden ser de muchos tipos variando su eficiencia y costo, entre ellos se destacan losa radiante, Fan Coils y Radiadores. En este caso se eligió losa radiante ya que es el sistema de mejor desempeño para calefacción y enfriamiento de edificaciones utilizando la energía geotérmica.

3.2 Datos mínimos de diseño de un intercambiador de calor de circuito cerrado vertical

Los datos mínimos de partida, criterios de dimensionamiento del intercambiador geotérmico cerrado vertical y procedimiento de diseño necesarios, deben ser diferentes en función de la complejidad de la instalación geotérmica proyectada.

Este diseño basado en la norma española (100715-1, Mayo 2014) distingue un tipo de instalación de intercambio geotérmico en circuito cerrado vertical con una potencia térmica de la instalación superior a 70KW, la cual está en función de la potencia prevista de la bomba de calor.

3.2 .1 Datos energéticos del edificio

Al considerar el perfil energético del edificio para el diseño de un intercambiador geotérmico hay que tener en cuenta tanto las cargas de diseño o potencia máxima como la demanda de energía del edificio. Las cargas de diseño se determinan para seleccionar la bomba de calor y están basadas en estándares aceptadas para una localización dada en el día más desfavorable de funcionamiento. Además de la potencia de la bomba de calor, en el diseño de los sistemas geotérmicos es imprescindible conocer la demanda energética del edificio, ya que únicamente cuando la bomba de calor esté en funcionamiento el intercambiador de calor cederá o absorberá calor. Debido a que la bomba de calor se dimensiona para las condiciones de funcionamiento más desfavorables, cuando la carga térmica del edificio sea inferior a la potencia de la bomba de calor, esta funcionará intermitentemente. Los datos de demanda energética anual del edificio en función de las variables constructivas y el uso fueron obtenidos a través de TRNSYS.

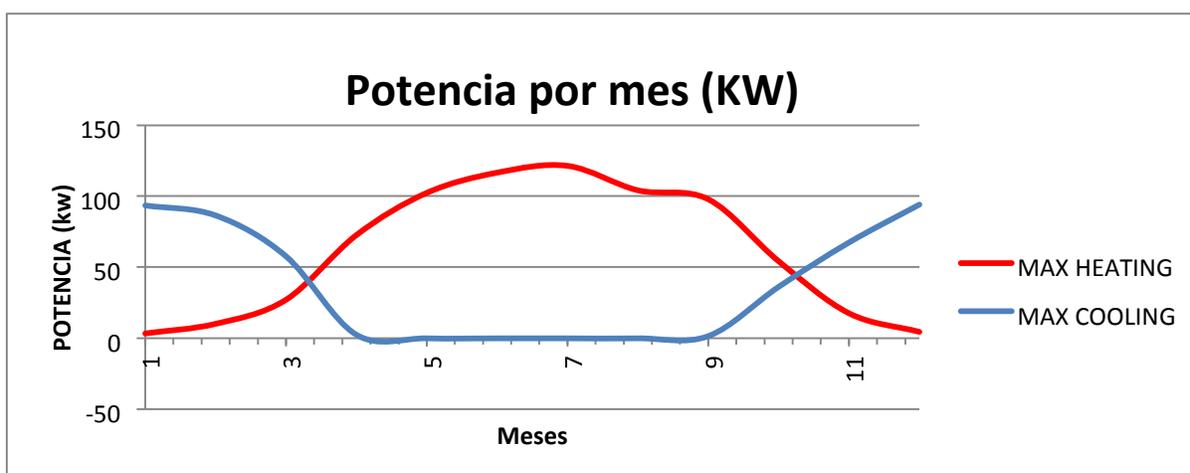


Figura 13: Curva de demanda térmica del edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Elaboración propia)

En el mes de julio el edificio presenta la mayor demanda térmica alcanzando una potencia de 121,42 KW.

Para el dimensionamiento del intercambiador geotérmico se trabajará con el 85 % aproximadamente de la demanda real, de esta forma abaratar costos en el diseño propuesto.

3.2.2 Caracterización del terreno

El diseño de los sistemas de intercambio geotérmico debe basarse en un conocimiento suficiente detallado del terreno. Para ello, se debe recopilar la información disponible para obtener las características geológicas e hidrológicas básicas de la zona de trabajo.

Para el estudio de este trabajo se utilizó mecánica de suelos realizada a petición del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, en la cual se ejecutaron dos sondajes SPT de 13 m y de 30 m de profundidad respectivamente, y para complementar con información a mayores profundidades se utilizó información de avenida general Bonilla, cerro la Pólvora y Nonguen, conociéndose hasta 50 m y luego basándose en supuestos respaldados por los académicos Ramiro Bonilla geólogo del Departamento de Geología y el ingeniero Civil Arturo Belmonte del Departamento de Geofísica, ambos de la Universidad de Concepción.

A raíz de estos antecedentes se define un suelo arena limosa hasta los 30 m SP-SM, a mayor profundidad se conoce un suelo rocoso granítico, meteorizado transformado en maicillo, el cual forma perfiles profundos generalmente arenos arcillosos por lo que se definirá el suelo tipo SP-SC, con una cota del nivel freático detectada a 2.0 m, bajo la superficie del terreno al momento de realizar el estudio, Octubre del 2012.



Figura 14: Ubicación prospecciones estudio mecánica de suelos, edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Proyecto de ingeniería del edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental)

En las instalaciones con una potencia térmica superior a 70 KW se necesitará conocer las características térmicas básicas del terreno determinadas por alguno de los métodos comúnmente aceptados. Como método de referencia se propone el ensayo TRT realizado sobre un sondeo piloto con una profundidad, geometría y acabado similar a la de los sondeos de captación.

3.3 Procedimiento de diseño de un intercambiador de calor vertical cerrado

3.3.1 Elección de la bomba de calor

Las especificaciones de la bomba de calor fijan parámetros de diseño del intercambiador enterrado, ya que determina el calor intercambiado con el suelo y el caudal que circula por el intercambiador de calor, además de dejar el rendimiento del sistema (Coefficient of performance COP), de acuerdo con sus curvas características de potencia-temperatura (figura 15 y 16).

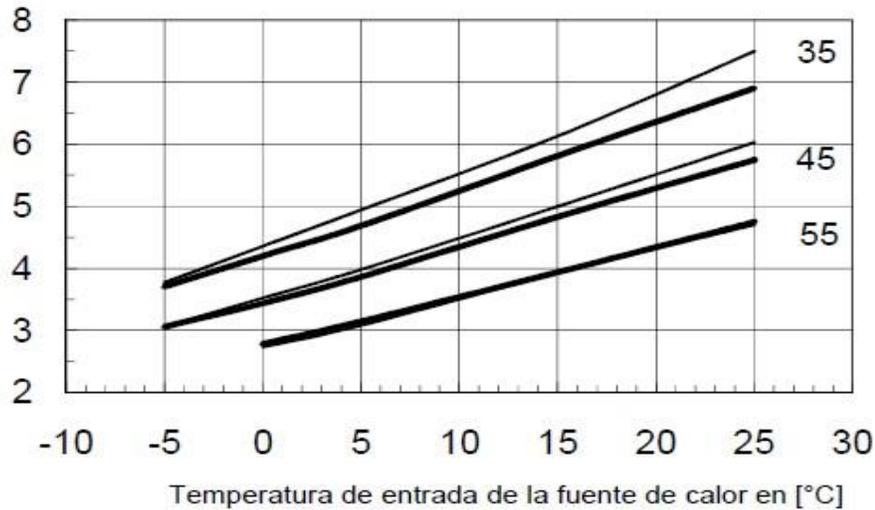


Figura15: Curva de rendimiento de calefacción para bomba de calor Dimplex, modelo SI 130TUR+ (Fuente Dimplex)

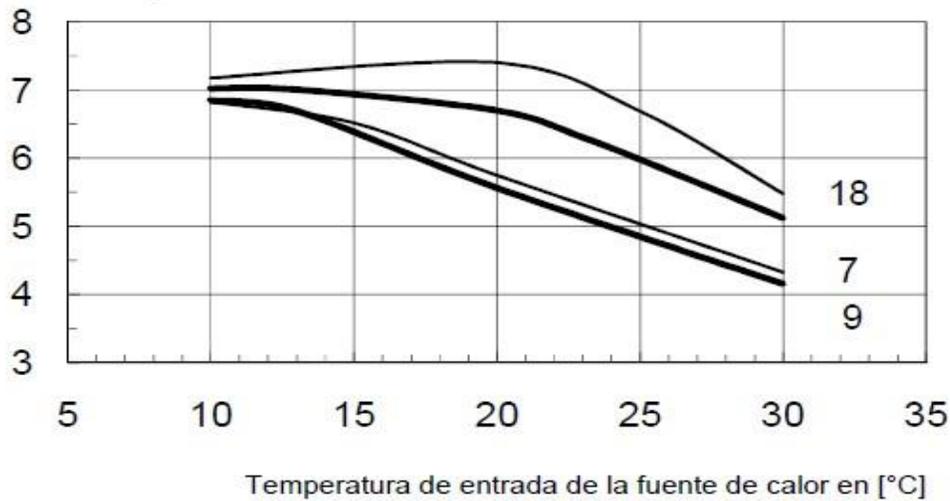


Figura 16: Curva de Rendimiento de refrigeración para bomba de calor Dimplex, modelo SI 130TUR+ (Fuente Dimplex)

Es necesario definir la temperatura del agua de retorno del sistema de distribución de calor (Use Side water inlet temperature), se sabe que la temperatura a la cual circulara el agua por el sistema es de 45 °C, pero al estar trabajando con una estructura de grandes magnitudes se generaran perdidas, por lo que se supuso una de temperatura de 30°C.

Luego se debe saber a qué temperatura está recibiendo la bomba de calor el fluido del intercambiador de calor que está retornando del subsuelo. Esta temperatura será a la cual la bomba de calor estará trabajando y determinará su rendimiento. El valor está comprendido en

un valor promedio de 8 a 9 °C, este valor se obtuvo dado el conocimiento del comportamiento del terreno y su evolución en el tiempo durante un plazo de 20 años, a través del software Earth Energy Design y corresponde al año 10, para los 12 meses de uso.

Un parámetro importante para esta simulación es saber a qué temperatura está ingresando este fluido al subsuelo, es decir, a que temperatura entrega la bomba de calor el fluido al subsuelo luego de hacerlo pasar por la válvula de expansión. Según lo leído en experiencias similares, el fluido sale a unos 5 °C aproximadamente, temperatura a la que ingresa al suelo.

Teniendo estas temperaturas de trabajo de la bomba de calor, y el gráfico de rendimiento, se escogerá una que logre a través de su coeficiente de desempeño aumentar la energía del subsuelo para cubrir la demanda energética del edificio tanto en calefacción como en refrigeración. Esta diferencia de energía que debe aportar la bomba de calor se mide a través del coeficiente de desempeño, se calcula dividiendo la energía demandada por el edificio por el calor obtenido del subsuelo. Los COP que logran satisfacer las demandas energéticas son COP de calefacción 4 y COP 4 de refrigeración.

Por lo tanto, se escoge una bomba de calor agua/agua, modelo SI30 TU3+, modelo distribuido por la empresa Alemana Dimplex (Dimplex, 2005), que cubre el 100% de la demanda térmica del edificio en estudio.

3.3.2 Selección de parámetros y desarrollo de la simulación

Se consideró un intercambiador geotérmico vertical, el cual posee una forma bastante común de instalación que considera la inmersión de una sonda geotérmica en forma de U. El diseño se llevó a cabo con el software EED – Earth Energy Design, en el Anexo B se presenta el desarrollo del diseño. Este dimensionamiento es información muy importante debido a que proporcionará los parámetros de distancia entre tubos, número de sondas geotérmicas y profundidad de estas.

En el diseño de un intercambiador geotérmico vertical, hay tres parámetros de relevancia que fueron utilizados en el software Earth Energy Design, son los siguientes:

- *Capacidad térmica volumétrica, C* : Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1m^3 de terreo a 1 kelvin. Expresa el volumen que es capaz de almacenar un volumen en terreno. (Unidad: $\frac{J}{\text{m}^3 K}$)
- *Conductividad térmica, λ* : Propiedad física de los materiales que mide su capacidad de conducción de calor. Se expresa como el flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura.(Unidad: $\frac{W}{mK}$)
- *Numero de Reynolds*, se utilizó para verificar que el agua tenga un comportamiento turbulento

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} > 2300 \text{ (Ec. 7)}$$

ρ : Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

V : Velocidad caracteriztica del fluido ($\frac{m}{s}$)

D : Diametro de la tubería por la cual circula el fluido (m)

μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\frac{m^2}{s}$)

El modelo corresponde al trabajo de los intercambiadores de calor para analizar la interferencia entre ellos y el aprovechamiento. Se definieron las condiciones iniciales y de flujo a utilizar según los antecedentes hidrogeológicos y geológicos del subsuelo, mostradas en la Tabla 1. En cuanto a las propiedades térmicas (conductividad térmica, capacidad calórica y la temperatura de la muestra del suelo), es necesario realizar mediciones de propiedades térmicas in-situ de los suelos, mediciones que se alejan del presupuesto de este trabajo, por lo tanto se utilizaron datos de estudios geo hidrológicos estudiados por académicos del departamento de Geofísica y Geología de la Universidad de Concepción”. Lo óptimo para el dimensionamiento de estos sistemas es realizar un ensayo térmico de los suelos para lograr optimizar el diseño del sistema geotérmico.

Los datos de conductividad térmica de los suelos mostrados son obtenidos a través de la norma española “Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica” para sistemas de circuito cerrado vertical”. Para la disipación de calor en el suelo.

El valor de permeabilidad del suelo ha sido obtenido de la Norma Española (100715-1,

Mayo 2014) y de literatura a través del libro Hidrología subterránea (Custodio y Llamas, 1976) valor mostrado en la Tabla 1.

Se consideró el agua como fluido de intercambio de calor. (LLopis, 2008)

Se considera el suelo saturado y con un flujo en movimiento, esta condición favorece el intercambio de.

| Parámetros de entrada del modelo | |
|--|------------|
| Parámetros Geológicos, hidrológicos y Geotécnicos | |
| Tipo de suelo | SP-SC |
| Nivel freático[m] | -2 |
| Humedad natural | Media alta |
| Temperatura del subsuelo [°C] | 13.6 |
| Conductividad térmica [W/mK] | 2.6 |
| Capacidad térmica volumétrica [MJ/M3k] | 2.5 |
| Propiedades del relleno Geotérmico y PVC | |
| Conductividad térmica relleno geotérmico [W/mK] | 2.35 |
| Conductividad Sonda geotérmica[W/mK] | 0.42 |
| Condiciones iniciales y de flujo | |
| T° del fluido en la entrada [°C] | 5°C |
| Fluido intercambiador | Agua |

Tabla 1: Parámetros, hidrogeológicos, geotécnicos y geológicos (Elaboración propia)

Se muestra en la Tabla 1 un cuadro resumen de los parámetros geológicos, hidrogeológicos y condiciones de flujo estudiados en las secciones anteriores para la realización de la simulación del modelo.

Con estos parámetros se logran definir todos los inputs necesarios para la realización del modelo del intercambiador de calor a través del software EED – Earth Energy Design.

4: PROPUESTA DE DISEÑO TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO CERRADO VERTICAL

En este capítulo se presenta el diseño y presupuesto económico de cada componente del sistema geotérmica vertical cerrado de baja entalpía, para el nuevo edificio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, de la Universidad del BíoBío.

4.1 Propuesta de Diseño

Se diseñó cada componente del sistema geotérmico de baja temperatura de la siguiente forma:

a) Sistema de distribución de calor

Para el sistema de distribución de calor se usó losa radiante en cada piso del edificio para entregar de forma uniforme el calor aportado por la bomba de calor y producir el confort térmico necesario.

b) Bomba de calor

Se utilizó una bomba de calor reversible tierra/agua, modelo SI 130TUR+, modelo distribuido por la empresa alemana Dimplex.

c) Intercambiador de calor vertical cerrado

Se diseñó un intercambiador de calor vertical cerrado vertical de tubos de polietileno, formado por 24 perforaciones con una profundidad de 119 [m] , diámetro 96,7 [mm].

El diseño se muestra en la Figura 6, donde se ve que el tubo de diámetro 32[mm] a la respectiva perforación, hasta el final de este donde hace una vuelta en U, para regresar por el otro costado y salir en pipe-out.

Por esta tubería circula un fluido intercambiador de calor que es agua, a una velocidad de 0,598m/s.

4.2 Tiempo de operación

Para los cálculos del tiempo de marcha del sistema geotérmico, se deberá realizar un cálculo de utilización de la bomba de calor, el cual representará la fracción de tiempo que estará en marcha la bomba de calor, y por consiguiente el tiempo de funcionamiento estacional de la instalación. Este valor es de gran relevancia ya que entregara la cantidad de calor que el sistema va a intercambiar con el suelo a lo largo del año.

Se tomaran las cargas de diseño entregadas por el programa Trnsys. La tabla 2 presenta los valores de diseño para la zona de interés.

| | Temperatura °C |
|-----------------------|----------------|
| T min (°C) | -0,9 |
| T max (°C) | 25,56 |
| T confort (°C) | 19 |

Tabla 2: Valores de las temperaturas de diseño (Elaboración propia)

Para desarrollar el siguiente estudio, se necesitan las temperaturas horarias de la zona de Concepción. Se usara la estación de Carriel Sur internacional como base de cálculos. Los procedimientos empleados se basan en el método de las “bin hours” (IDAE, 2010), y son aproximados, teniendo en consideración que un estudio detallado incluiría modelaciones dinámicas y consideraría todas las pérdidas y ganancias de la edificación.

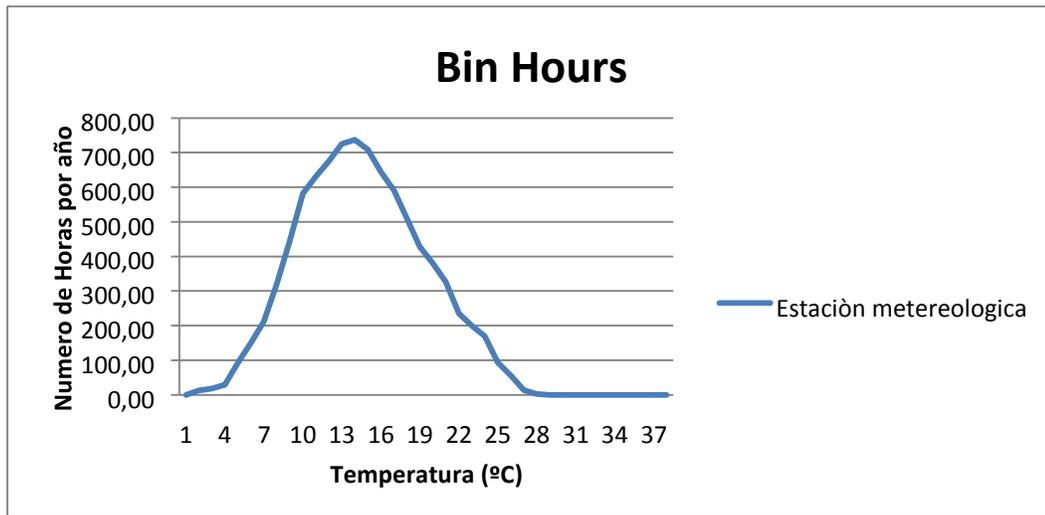


Figura 17: Histograma de temperaturas anuales de la ciudad de Concepción en base a datos a datos de estación Carriel Sur Internacional, 2013 (Elaboración propia)

En la tabla se observa la cantidad de horas que se logra cada temperatura en un año. Al analizar las temperaturas inferiores a 19 °C, se obtiene que las horas de trabajo de la bomba de calor serán 737 [hr] en un año.

4.3 Propuesta de diseño final

Se muestra un esquema con la propuesta de diseño final, que resume todos los parámetros estudiados en este trabajo

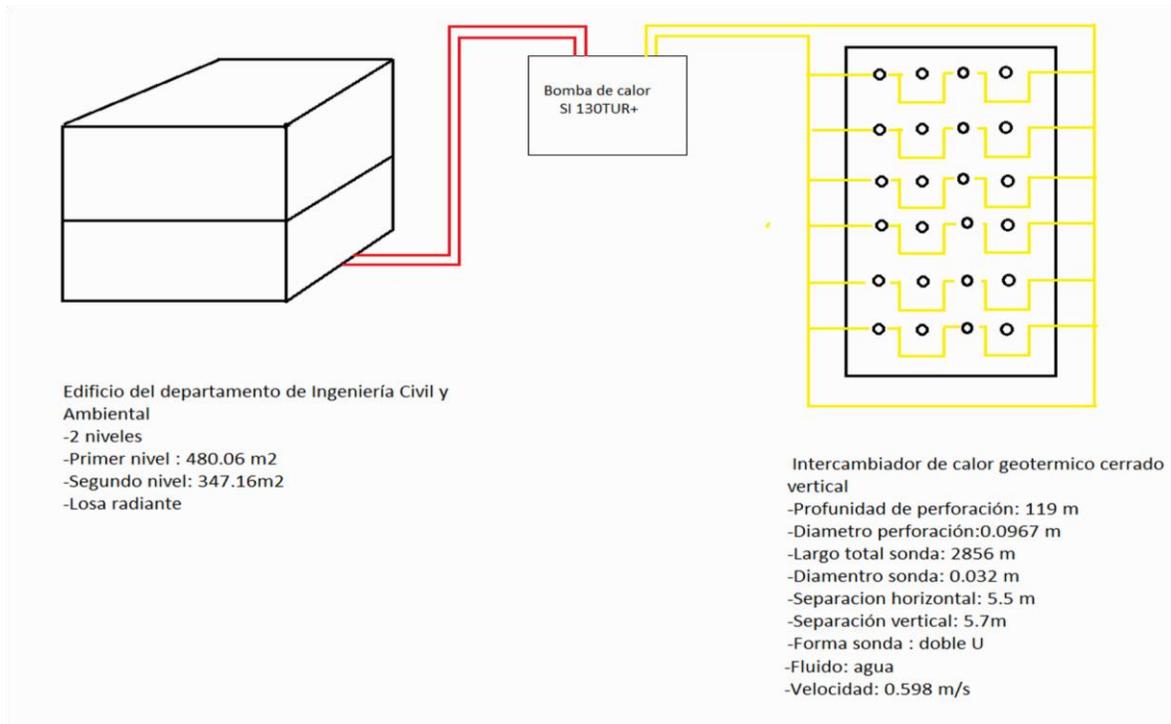


Figura 18: Propuesta de diseño final (Elaboración propia)

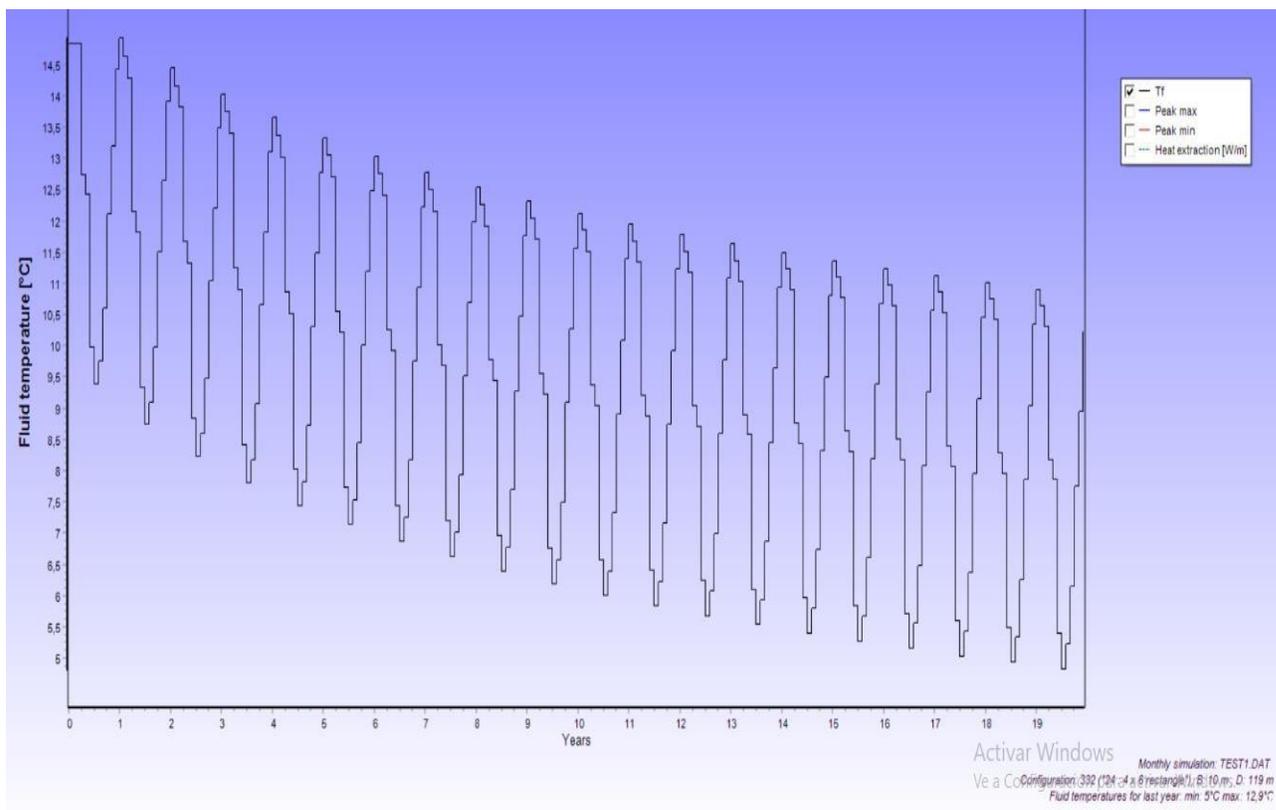


Figura 19: Temperaturas del fluido en el intercambiador de calor diseñado, para una vida útil de veinte años (Fuente EED,2017)

4.4 Análisis económico del diseño final

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

Cabe destacar que actualmente el gasto energético de un edificio producto del sistema de climatización, está entre el 40% y el 65% del gasto total de un edificio (Ing. Juan Carlos Troncoso U., Presidente de la Asociación de Profesionales de Climatización y Refrigeración de Chile (DITAR, 2016)

4.4.1 Inversión

| | Cantidad | Unidad | Subtotal [CLP] | Empresa |
|---|----------|--------|--------------------|------------|
| <i>Intercambiador de calor geotérmico</i> | | | | |
| Sondas geotérmicas (Incluye distanciador para tubos y tubos de inyección) | 2856 | [m] | 16.326.300 | Rehau |
| Conjunto unión sondas geotérmicas | 24 | [Ud] | 1.799.203 | Rehau |
| Relleno geotermico,GeoSolid | 14,129 | [m3] | 6.871.944 | Rehau |
| <i>Perforación</i> | 2856 | [m] | 85.680.000 | Liem Ltda. |
| <i>Conjunto bomba de calor</i> | 1 | [Ud] | 19.900.504 | Dimplex |
| Suelo radiante | 804.11 | [m2] | 27.751.134 | Multibeton |
| Total | | | 158.329.085 | |

Tabla 3: Principales costos de inversión del sistema (Elaboración propia)

Al analizar los datos expuestos se pueden apreciar que el ítem de la construcción de pozos es el de mayor importancia dentro de la inversión inicial considerando perforaciones mayores de 100 m, por lo tanto el punto crítico de la evaluación económica del proyecto. Cabe recalcar que diseñar a mayor profundidad en vez de realizar más perforaciones genera valores más bajos y un comportamiento más eficiente el intercambiador.

Para un periodo de vida total de una calefacción geotérmica de mínimo 20 años, el sobre coste de adquisición frente a una calefacción de gasóleo ya queda amortizado en 5–10 años. En el caso de una calefacción a gas este periodo de tiempo es de entre 8 y 13 años (dbresearch, 2009).

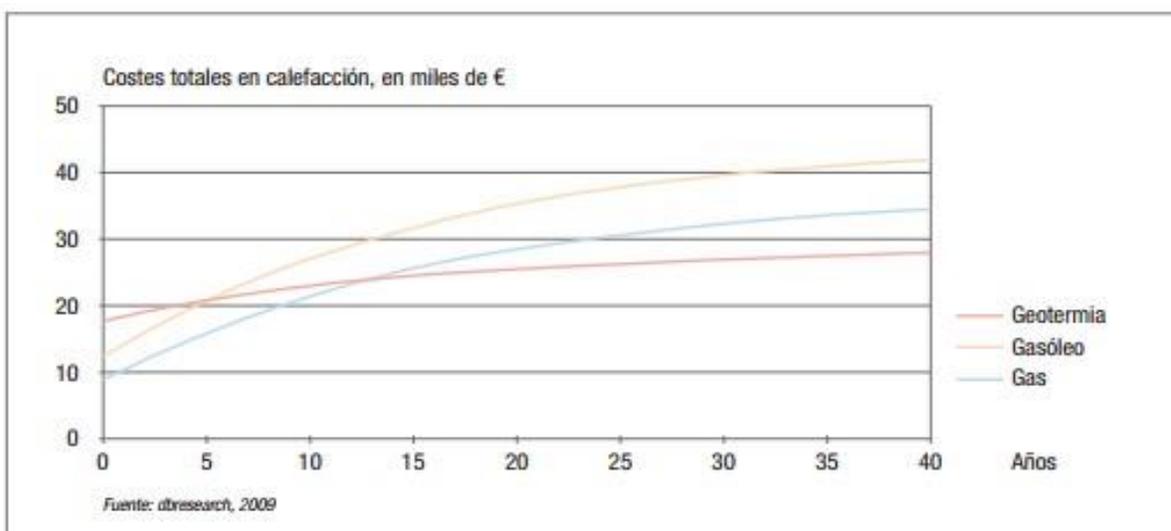


Figura20: Amortización del aprovechamiento geotérmico (Fuente (REHAU, 2013))

5: CONCLUSIONES

Al desarrollar el estudio geológico de los suelos de la Universidad del Bío Bío se obtuvo que estos poseen alta conductividad térmica y capacidad volumétrica, lo cual lo hace un suelo ideal para realizar un proyecto de energía geotérmica. Cabe destacar que se recomienda por la envergadura del proyecto realizar un test de respuesta térmica.

Se evidencia la reducción de emisiones de CO_2 hasta en un 75% en comparación a un sistema convencional de climatización. Es por que los beneficios sociales y ambientales que tendría este proyecto son muy relevantes a la hora de evaluar socialmente la propuesta, y generan una oportunidad de innovación y desarrollo que podrían justificar la ejecución de este proyecto por sobre todo si ocurre en un edificio público.

La bomba de calor seleccionada, Dimplex SI 130TU+, cumple con altas expectativas la demanda térmica del edificio al poseer un COP 4 para calefacción.

La bomba de calor Dimplex SI130TUR+, al ser reversible y tener un coeficiente de refrigeración de 4, permite obtener el confort térmico del edificio en los meses de verano, garantizando aire acondicionado cuando este se necesite.

6: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 100715-1, UNE. (Mayo 2014). Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Madrid, España.
- Blomberg, D. T. (2015). Earth Energy Designer . Cambridge, USA.
- dbresearch. (2009).
- Dimplex. (2005).
- Dimplex. (2011).
- DITAR. (2016).
- EED. (2017).
- Energylab. (2011). 2" Módulo 5:5.1-Bomba de calor", Diseño de Proyectos de BCG. En Centro Tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética. Santiago de Chile.
- IDEA.(2010)Fuente Guía técnica: Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.
- IDAE. (2010). Instituto para Diversificación de la Energía.
- Llamas, C. y. (1976). Hidrología subterránea.
- LLopis, G. (2008). Guía de la Energía Geotérmica. Madrid, España.
- Mercateo. (2017). <https://www.mercateo.com/>.
- precios, C. (2016).
http: //www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=7|0_0_0_0_0|2|ICU010|icu_sonda:_0_1_1c19_0_1c4_0_6c3_0_170_0_0.
- REHAU. (2013). Manual sondas geotermicas.

- UBB, CITEC. (2000). Manual de hermeticidad al aire en edificaciones. Concepción.
- UBB, CITEC. (2012). Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos. Concepción.
- VDI. (2001). Verein Deutcher Ingenieure. Alemania.
- VDI. (2010). Verein Deutcher Ingenieure. Alemania.
- Vielma Sossa, M. S. (2013). Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial. Santiago.

ANEXOS

Anexo A: “Calculo de demanda energética del edificio”

Del proyecto diseñado de la edificación en cuestión, se han realizado las siguientes aproximaciones:

Se verificará que la cota de piso terminado de todos los pavimentos interiores queden a un mismo nivel. Los suelos del edificio han sido clasificados en 4:

| Pavimento | Espesor |
|--|---------|
| Salas en General; Piso Vinílico | 0.152 m |
| Oficinas en General; Tablón flexible | 0.153 m |
| Baños; Porcelanato | 0.156 m |
| Hall y Accesos primer piso; Piedra pizarra | 0.156 |

Tabla A 1: Pavimentos

Los cielos han sido clasificados en 3:

| Cielos | Espesor |
|-------------------------------|---------|
| Cielo general; Yeso Cartón | 0.165 m |
| Cielo Hall; Placa Acústica | 0.162 m |
| Cielo Pasillos; Cielo Modular | 0.160 m |

Tabla A 2: Cielos

Los tabiques exteriores han sido clasificados en dos tipos:

| Tabiques exteriores | Espesor |
|-------------------------|---------|
| Tabique General; Estuco | 0.095 m |
| Tabique Baños; | 0.61 |

Tabla A 3: Tabiques exteriores

Los tabiques interiores se clasificaran en 4 tipos:

| Tabiques Interiores | Espesor |
|---------------------|---------|
| Tabique general | 0.6 m |
| Tabique Baños | 0.054 m |
| Tabique CAA y Baños | 0.054 m |
| Tabique dobles | 0.125 m |

Tabla A 4: Revestimientos Interiores

En el presente anexo se presenta el del estudio energético del edificio, desarrollado con el software Trnsys, en función de las variables constructivas y el uso . De este se obtuvieron la demanda energética y la potencia peak, basada en el día más desfavorable del año, en una cierta localización.

TRNBuild

Este programa, parte con la creación de las zonas térmicas del edificio considerando la geometría, elementos constructivos, ocupación, equipos, infiltraciones, etc.

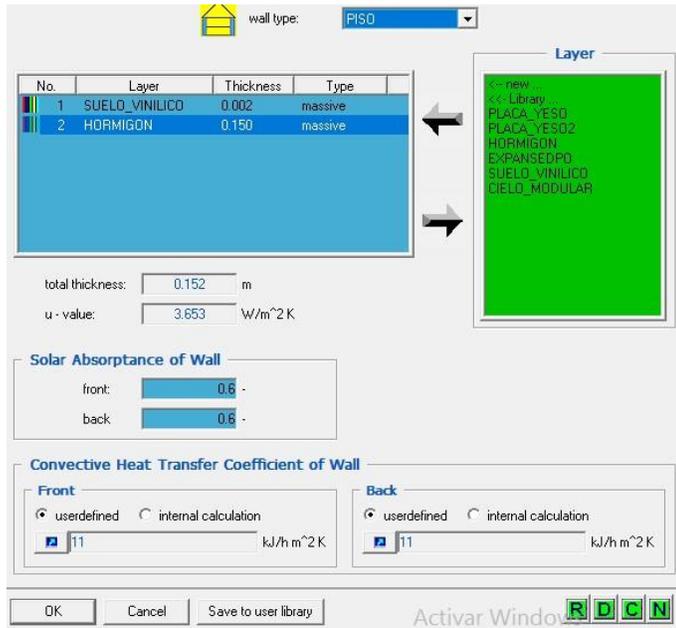


Ilustración A 1: Creación muros del edificio

El edificio se separó en dos zonas térmicas, primer y segundo piso, considerando que el comportamiento térmico de los sub espacios en estas zonas son muy similares.



Ilustración A 2: Creación de las zonas térmicas del edificio

La configuración de los parámetros que condicionan la temperatura de las distintas zonas térmicas deben ser editadas zona por zona.



Ilustración A 3: Herramientas de TRNSYS para definición térmica de las distintas zonas de climatización.

Lo primero a tener en cuenta es el modelo de infiltraciones que se pretenda implementar en cada zona.

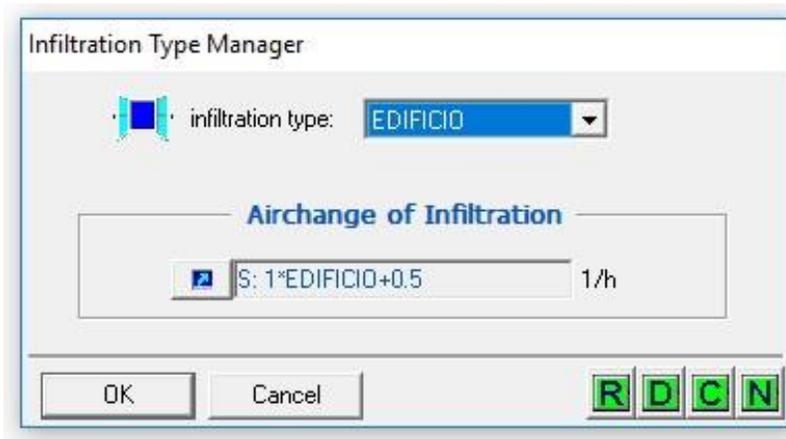


Ilustración A 4: Tasa de infiltración elegida para la zona en cuestión

Todos los parámetros restantes son equivalentes en funcionamiento, variando la naturaleza de sus valores.

Todos ellos son, además de las citadas infiltraciones:

- Ventilación
- Calefacción
- Refrigeración
- Confort
- Ganancias

Gains [Zone: PISO1]

off
 on

Persons

ISO 7730 Table

degree of activity

Seated at rest

VDI 2078 Table

scale: S: 200*EDIFICIO

off
 on

Computer

computer type
230 W PC with colour mon

scale

S: 1*EDIFICIO+50

off
 on

Artificial Lighting

total heat gain
5 W/m²

related floor area: 4.7 m²

convective part
0 %

control strategy

1

scale
S: 1*EDIFICIO+100

off
 on

Other Gains

| Type | Scale | Geo Position |
|------|-------|--------------|
| | | |

Add
Delete

Ilustración A 5: Ventana de la herramienta para la configuración de ganancias del piso

Trnsys Studio

En Simulation Studio se realiza la simulación completa que contiene diversas herramientas de lo ya realizado y otras herramientas a ingresar

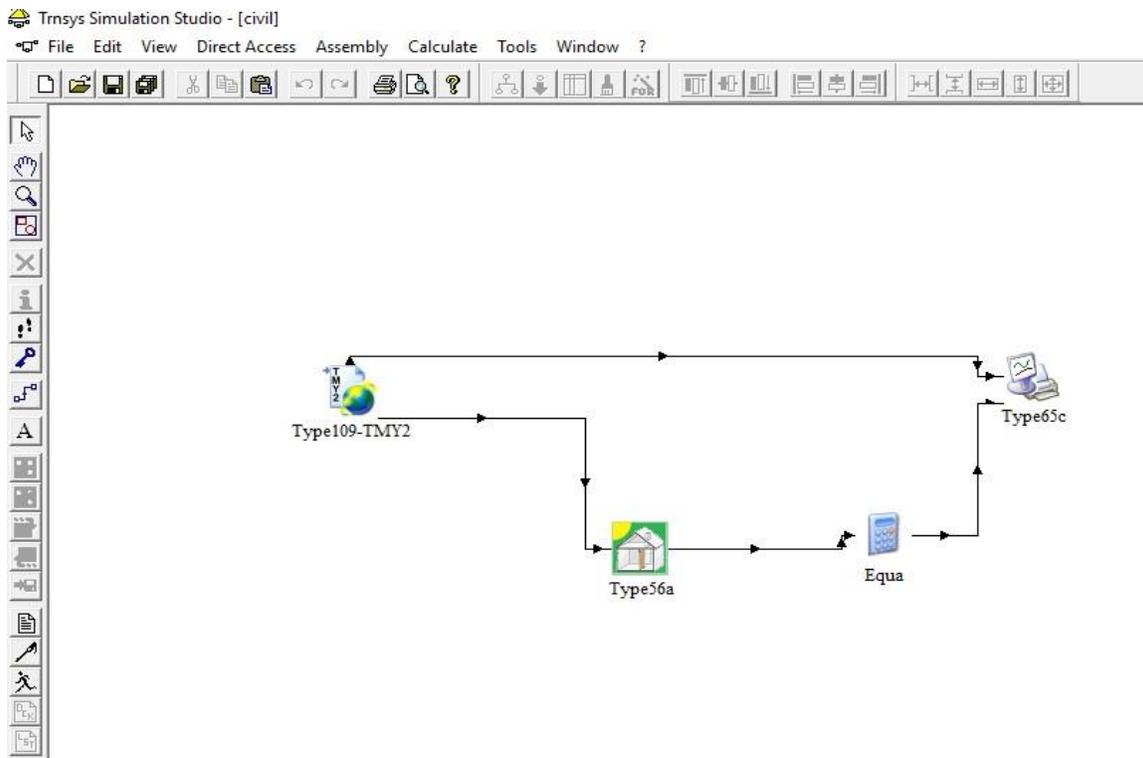


Ilustración A 6: Interfaz de usuario de TRNSYS Simulation Studio. Elaboración propia

En este entorno se trabaja con distintos elementos:

- En primer lugar, están los parámetros de entrada o inputs, los cuales se configuran y definen previamente una vez se han implementado en el entorno de trabajo. Estos inputs sirven para definir las condiciones de trabajo del edificio, controlar el equipamiento de la instalación, añadir a la simulación datos de temperatura y/o radiación anual, que se conectan a otros componentes.
- De los componentes salen los llamados outputs, que son los parámetros de salida de los componentes, tras procesar los outputs y realizar las operaciones correspondientes.

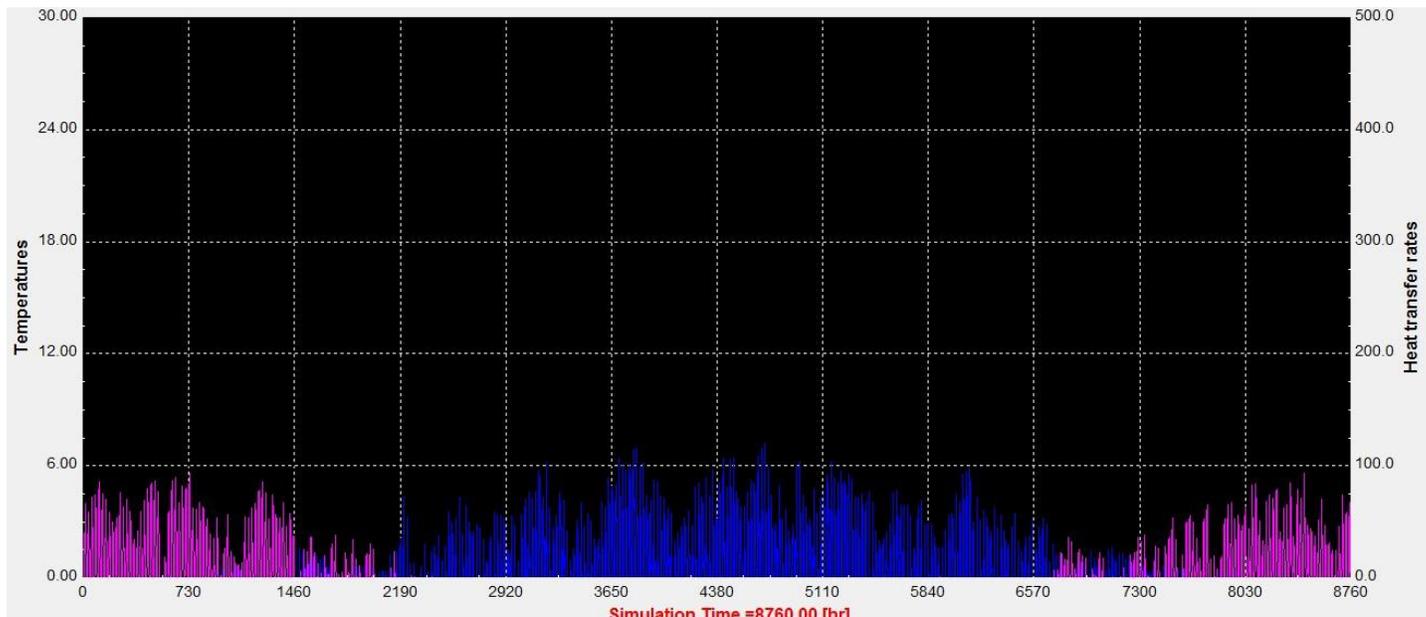


Ilustración A 7: Interfaz de Trnsys

En la curva de la demanda obtenida por Trnsys se representa el comportamiento, para calefacción y para refrigeración, todas las cargas térmicas del edificio, tanto las que influyen positiva como negativamente, es decir, las pérdidas y ganancias del sistema. En calefacción, las cargas consideradas por el programa son: conducción de muros, cubierta, infiltraciones, iluminación, ocupantes y equipos. En refrigeración, además, en las cargas debidas a infiltraciones, ocupantes, iluminación y equipos se determinan tanto el calor sensible como el latente.

| | MAX HEATING | MAX COOLING | T. Amb. Prom Mensual | T Prom Anual |
|----------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| ENERO | 3,47 | 93,41 | 16,33 | 12,14 |
| FEBRERO | 10,25 | 86,36 | 15,66 | 12,14 |
| MARZO | 27,2 | 57,66 | 13,93 | 12,14 |
| ABRIL | 72,67 | 2,52 | 11,85 | 12,14 |
| MAYO | 102,4 | 0 | 10,89 | 12,14 |
| JUNIO | 116,65 | 0 | 9,08 | 12,14 |

| | | | | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|
| JULIO | 121,42 | 0 | 8,84 | 12,14 |
| AGOSTO | 104,19 | 0 | 9,15 | 12,14 |
| SEPTIEMBRE | 97,9 | 1,55 | 9,53 | 12,14 |
| OCTUBRE | 54,28 | 36,2 | 11,52 | 12,14 |
| NOVIEMBRE | 17,65 | 67,39 | 13,36 | 12,14 |
| DICIEMBRE | 4,58 | 94,04 | 15,52 | 12,14 |

Tabla A 5: Resumen de comportamiento térmico del edificio

Anexo B: “Dimensionamiento del intercambiador de calor”

El diseño fue realizado con el programa Earth energy designer , programa de PC para diseño de intercambiadores de calor de pozo vertical.

1. Propiedades del terreno

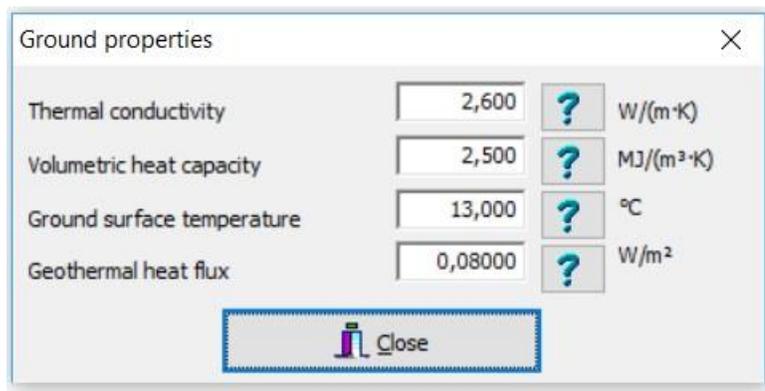


Ilustración B 1 : Menú de propiedades del terreno

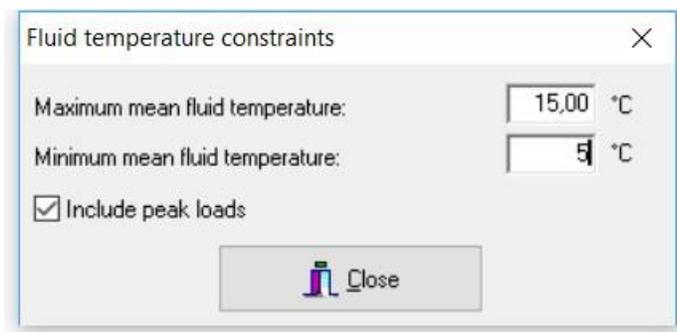


Ilustración B 2: Restricciones de temperatura del terreno

2. Agujero de perforación para el tipo de intercambiador de calor

En este ítem se describe el número, geometría, profundidad, diámetro de los agujeros y con los datos del intercambiador de calor.

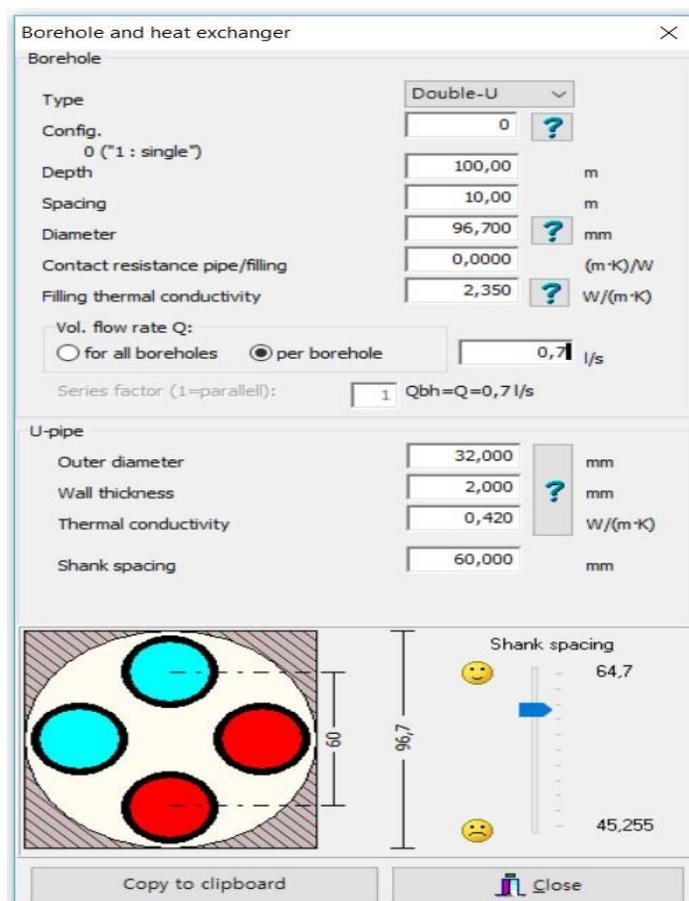


Ilustración B 3: Características de diseño de la perforación

3. Fluido del transportador de calor

Este ítem contiene campos de entrada para conductividad térmica, capacidad de calor específico, densidad, viscosidad y punto de congelación del fluido.

| Property | Value | Unit |
|------------------------|-----------|----------|
| Thermal conductivity | 0,5720 | W/(m·K) |
| Specific heat capacity | 4202,0000 | J/(Kg·K) |
| Density | 1000,0000 | Kg/m³ |
| Viscosity | 0,001520 | Kg/(m·s) |
| Freezing point | 0,00 | °C |

Ilustración B 4: Datos de entrada para fluido portador de calor.

□ *Demostración fluido turbulento, a través de Reynolds*

$$Re = \frac{1000 * 0.032 * V}{0.0052} > 2300$$

$$V = 0.598 \text{ m/s}$$

$$Re = 3680 > 2300$$

4. Entrada de datos de carga base

Se muestra la entrada para las cargas de calentamiento y enfriamiento. EED ofrece dos métodos de entrada "Energía anual y perfil mensual", en este proyecto se utilizó el segundo, ya que permite el modelado de un perfil de carga específico que incluye cargas independientes de las estaciones.

Base load X

Base load (without DHW):

Annual energy and monthly profile

Monthly energy values

| [MWh] | Heat | Cool | Ground |
|-----------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Annual | <input type="text" value="16,200"/> | <input type="text" value="0,000"/> | <input type="button" value="Update"/> |
| SPF | <input type="text" value="4,00"/> | <input type="text" value="6,50"/> | |
| | <input type="checkbox"/> Direct | <input type="checkbox"/> Direct | |
| January | 0,000 | 5,502 | -6,348 |
| February | 0,000 | 2,697 | -3,112 |
| March | 0,000 | 0,175 | -0,202 |
| April | 21,080 | 0,000 | 15,810 |
| May | 22,280 | 0,000 | 16,710 |
| June | 45,500 | 0,000 | 34,125 |
| July | 48,170 | 0,000 | 36,127 |
| August | 42,150 | 0,000 | 31,613 |
| September | 32,030 | 0,000 | 24,022 |
| October | 16,370 | 0,000 | 12,278 |
| November | 6,082 | 0,000 | 4,561 |
| December | 0,000 | 3,275 | -3,779 |
| Sum: | 233,66 | 11,649 | 161,81 |

Domestic hot water (DHW):

Annual SPF

| [MWh] | Heat pump | Ground | Building |
|--|-----------------------------------|---|------------|
| Heat: | $233,66 \times 1/4$ (58,415) | $+ 233,66 \times 3/4$ (175,25) | = 233,66 |
| DHW: | $1 \times 1/1$ (1) | $+ 1 \times 0/1$ (0) | = 1 |
| Cool: | $11,649 \times 1/6,5$ (1,7922) | $+ -11,649 \times 7,5/6,5$ (-13,441) | = -11,649 |
| Heat: | Heat pump 59,415 ==> ^ | Building 175,25 | ==> 234,66 |
| Cool: | Heat pump 1,7922 ==> v | Building 13,441 | <== 11,649 |
| Heat extracted from ground: $175,25 + 0 - 13,441 = 161,81$ | | | |

Ilustración B 5: Datos de entrada carga base de edificio

5. Entrada de datos de carga máxima

Potencias peak de calor y de enfriamiento. Por cada mes la máxima carga (en este caso la más desfavorable es la salida máxima de calentamiento), los valores presentados son aproximadamente el 85% de la demanda real.

| | Peak heat | | Peak cool | |
|-----------|------------|--------------|------------|--------------|
| | Power [kW] | Duration [h] | Power [kW] | Duration [h] |
| January | 0,000 | 0,000 | 45,000 | 6,000 |
| February | 0,000 | 0,000 | 33,000 | 6,000 |
| March | 0,000 | 0,000 | 20,000 | 6,000 |
| April | 3,000 | 2,000 | 0,000 | 0,000 |
| May | 26,000 | 4,000 | 0,000 | 0,000 |
| June | 48,000 | 4,000 | 0,000 | 0,000 |
| July | 60,000 | 4,000 | 0,000 | 0,000 |
| August | 40,000 | 4,000 | 0,000 | 0,000 |
| September | 20,000 | 4,000 | 0,000 | 0,000 |
| October | 3,000 | 2,000 | 0,000 | 0,000 |
| November | 1,000 | 2,000 | 0,000 | 0,000 |
| December | 0,000 | 0,000 | 37,000 | 6,000 |

Ilustración B 5: Potencias peak de calor y enfriamiento.

6. Resultados de salida

Después de completar el cálculo anterior, se visualiza una ventana que muestra los datos de entrada y los resultados obtenidos.

| QUICK FACTS | |
|---------------------------------|------------------------------|
| Cost | - |
| Number of boreholes | 24 |
| Borehole depth | 119 m |
| Total borehole length | 2856 m |
| D E S I G N D A T A | |
| ===== | |
| GROUND | |
| Ground thermal conductivity | 2,6 W/(m·K) |
| Ground heat capacity | 2,5 MJ/(m ³ ·K) |
| Ground surface temperature | 13 °C |
| Geothermal heat flux | 0,08 W/m ² |
| BOREHOLE | |
| Configuration: | 332 ("24 : 4 x 6 rectangle") |
| Borehole depth | 119 m |
| Borehole spacing | 10 m |
| Borehole installation | Double-U |
| Borehole diameter | 96,7 mm |
| U-pipe diameter | 32 mm |
| U-pipe thickness | 2 mm |
| U-pipe thermal conductivity | 0,42 W/(m·K) |
| U-pipe shank spacing | 61 mm |
| Filling thermal conductivity | 2,4 W/(m·K) |
| Contact resistance pipe/filling | 0 (m·K)/W |

Ilustración B 6: Resultados del diseño del intercambiador geotérmico vertical