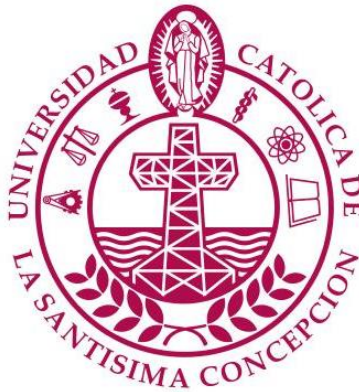


UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil Geológica



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN CON BOMBA DE CALOR GEOTERMICA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN.

ALDO PATRICIO VIDAL LEPE

INFORME DE PROYECTO DE TITULO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL GEOLOGO

Profesor guía: Francesc Xavier Ferraro.
Profesor Informante: Felipe González.

Concepción, Agosto, 2017

RESUMEN:

El presente proyecto tiene como propósito el estudio de la factibilidad para la implementación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en reemplazo de un sistema de calefacción mediante calderas a gas natural, en el edificio de la facultad de ingeniería de la universidad católica de la santísima concepción, ubicada en la ciudad de concepción, Chile. Para ello se emplearán cálculos teóricos y simulaciones realizadas mediante programas informáticos con el fin de estimar los parámetros técnicos necesarios para su viabilidad. Estimo la demanda energética del edificio a lo largo del año, tomando como base para este cálculo el trabajo de Muñoz (2017) el cual utiliza las ecuaciones propuestas por diferentes autores para determinar las cargas térmicas del edificio. Conociendo la potencia necesaria para calefaccionar el edificio, ya que por su ocupación no se requirió refrigeración, se dimensionaron 2 posibilidades para un sistema de calefacción geotérmico. Consistentes en bombas de calor geotérmicas (BCG), con diferentes temperaturas de impulsión, las que realizan el intercambio de calor con el terreno a través de sondas geotérmicas verticales U-Doble. Los colectores se dimensionaron mediante el software Earth Energy Designer. El estudio económico determino la necesidad de una elevada inversión inicial para ambos casos, siendo esta mayor en la BCG que trabaja a menor temperatura debido a la necesidad de reemplazar el sistema actual de radiadores del edificio por radiadores más eficientes energéticamente. La BCG de alta temperatura fue la que obtuvo las mejores rentabilidades durante la vida útil del sistema.

ABSTRACT:

The purpose of this project is to study the feasibility of implementing an air conditioning system with a geothermal heat pump to replace a heating system using natural gas boilers in the building of the engineering faculty of the Catholic University of the most Holy Conception, located in the city of Conception, Chile. For this purpose, theoretical calculations and simulations using software will be used in order to estimate the technical parameters necessary for its viability. The energy demand of the building was estimated throughout the year, taking as a basis for this calculation the work of Muñoz (2017) which uses the equations proposed by different authors to determine the thermal loads of the building. Knowing the power required to heat the building, because of its occupation was not required refrigeration, two possibilities were designed for a geothermal heating system. Consisting of geothermal heat pumps (BCG), with different flow temperatures, those that perform the heat exchange with the terrain through U-Double vertical geothermal probes. The collectors were sized using Earth Energy Designer software. The economic study determined the need for a high initial investment for both cases, which is greater in the BCG that works at a lower temperature due to the need to replace the current system of radiators of the building with more energy efficient radiators. The high temperature BCG was the one that obtained the best returns during the life of the system.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	Objetivo General.....	5
1.2	Objetivos específicos	6
2.	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Geotermia.....	6
2.2	Propagación del calor.....	7
2.3	Recursos geotérmicos	8
2.4	Geotermia de muy baja entalpía.....	8
2.5	Bombas de calor geotérmicas	9
2.6	Circuitos de captación geotérmicos	12
2.6.1	Cimientos geotérmicos	12
2.6.2	Pozos abiertos.....	12
2.6.3	Colectores horizontales.....	13
2.6.4	Sondas geotérmicas verticales	15
2.7	Sistemas de distribución del calor.....	17
2.7.1	Ventiloconvector o aerotermo:	17
2.7.2	Radiador:	18
2.7.3	Suelo radiante:	18
2.8	Propiedades térmicas del terreno	19
3.	METODOLOGIA.....	20
3.1	Litología y propiedades térmicas del terreno.....	20
3.2	Metodología de cálculo para la demanda energética	24
3.2.1	Condiciones climáticas de diseño.....	24
3.2.2	Características del edificio.....	25
3.2.3	Demanda energética	27
3.2.4	Distribución mensual de la demanda energética.....	33
4.	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA GEOTERMICO	34
4.1	Elección del tipo de captación geotérmica.....	34
4.1.1	Valoración de los colectores horizontales	34
4.1.2	Valoración de un circuito abierto	34
4.1.3	Valoración de pilote geotérmico.....	35
4.1.4	Valoración de los colectores verticales.....	35
4.2	Elección de la bomba de calor geotérmica.....	35
4.2.1	Bomba de calor de alta temperatura.	36
4.2.2	Bomba de calor tradicional.....	37
4.3	Diseño del sistema de captación geotérmico	39
4.3.1	Ingresando las propiedades del terreno.....	40
4.3.2	Datos del sondeo e intercambiador geotérmico.....	40
4.3.3	Fluido caloportador.....	42
4.3.4	Demanda base y demanda peak.....	42
4.4	Resultados de las simulaciones	44
4.4.1	Sistema de colectores utilizando la bomba de alta temperatura	44
4.4.2	Sistema de colectores utilizando la bomba de calor tradicional.	46

4.5	Esquema del sistema de captación geotérmico	48
5.	ANÁLISIS FINANCIERO	50
5.1	Costos de inversión	50
5.2	Análisis de rentabilidad.....	52
5.2.1	Costos de funcionamiento de la caldera.	53
5.2.2	Energía eléctrica consumida por el compresor.....	54
5.2.3	Flujo de caja neto.....	54
5.2.4	Evolución de los costes de funcionamiento.....	55
5.2.5	Valor actualizado neto.....	55
6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	57
7.	CONCLUSIONES	59
8.	REFERENCIAS	60
9.	Anexo 1: Bases de datos climáticas.....	63
9.1	Radiación solar incidente.....	63
9.2	Temperaturas exteriores.....	66
9.3	Humedad relativa exterior.....	67
9.4	Velocidad del viento	68
9.5	Dirección del viento.....	68
10.	Anexo 2: Cálculo de cargas térmicas	70
10.1	Carga sensible por radiación solar a través del cristal “Qs”	70
10.1.1	Ganancias solares directas	70
10.1.2	Ganancias solares indirectas.....	72
10.2	Carga sensible por transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores “Qstr”	75
10.2.1	Coeficientes de transmitancia térmica.....	75
10.2.2	Cargas por transmisión y radiación a través de la envolvente.....	77
10.3	Carga sensible transmitida por infiltraciones de aire exterior “Qsi”.....	79
10.3.1	Carga sensible por ventilación.....	79
10.3.2	Carga sensible por infiltración.....	82
10.4	Carga sensible por aportaciones internas “Qsai”	86
10.4.1	Carga sensible por iluminación “Qsil”	86
10.4.2	Carga sensible por ocupantes “Qsp”	88
10.4.3	Carga sensible por aparatos eléctricos “Qse”.....	89
10.5	Carga latente transmitida por infiltraciones y ventilación “Qli”.....	90
10.6	Carga latente debido a la ocupación “Qlp”.....	93
11.	Anexo 3: Dimensionamiento del sistema de radiadores.....	94

1. INTRODUCCIÓN

En la última década las energías renovables están cobrando cada vez más importancia en nuestra sociedad, la que fundo su subsistencia sobre el aprovechamiento de recursos naturales no renovables, como lo son los recursos fósiles. El problema de la dependencia de los recursos naturales para producir energía ha sido siempre enorme, además de las consecuencias del uso indiscriminado de estos. El calentamiento global del planeta asociado al cambio climático, el efecto invernadero, el agotamiento de los combustibles fósiles y el incremento del precio de estos recursos han sido los factores claves para cambiar la matriz de recursos energéticos. Esto llevo al desarrollo de nuevas tecnologías, con el objetivo de optimizar el aprovechamiento de los recursos tradicionales y de ampliar el campo de recursos aprovechables por el hombre.

Para satisfacer nuestras necesidades energéticas de calefacción, la electricidad en comparación con el gas natural, el gas licuado y el kerosene, es la única fuente que, al no ser combustible, no genera contaminación ni en el interior ni el exterior de los hogares. Pero además es competitiva en precio cuando es comparado con una de las formas más comunes de calefaccionarse por los chilenos, quienes lo hacen a través de recursos como biomasa, gas y electricidad (Yañez, 2017). El gobierno ya ha tomado medidas para reducir las emisiones de contaminantes generadas por la combustión de residencial de leña a través de los programas de recambio de calefactores a leña del Ministerio del Medio Ambiente (de ahora en adelante MMA) por sistemas eléctricos o menos contaminantes, en las zonas residenciales más contaminadas (MMA 2017).

Sin embargo, según un estudio comparativo del valor del kW en diferentes países del cono sur llevado a cabo por el Centro de Estudio de la Regulación Económica de los Servicios Públicos (CERES, 2016)) en marzo del 2016, el precio de la electricidad en Chile es de los más caros de Sudamérica. Por ejemplo, respecto a Argentina para un usuario residencial la tarifa eléctrica en Chile es 2,7 veces más cara, respecto a Bolivia 2,1 veces, mientras que respecto a Perú y Brasil alrededor de 1,3 veces más cara. Este valor excesivo nos lleva a buscar tecnologías más eficientes que nos permitan mayor economía energética.

A diferencia de los calefactores eléctricos típicos que entregan 1 kW térmico por cada kW eléctrico, las bombas de calor típicamente por cada 1 kW eléctrico consumido entregaran 3 a 5 kW térmicos a la vivienda. Esta eficiencia se basa en que no se invierte energía en generar calor, sino en trasladarlo de un lugar a otro. Si la fuente de este calor es el terreno hablamos de una bomba de calor geotérmica. Este es un sistema que permite aprovechar una energía renovable como lo es el calor presente en la tierra de un modo económico y ecológico al no necesitar combustión ni emitir contaminante alguno durante su funcionamiento.

1.1 Objetivo General

El objetivo general es: Determinar la factibilidad de implementar un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para el edificio de la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, en reemplazo del sistema de calefacción actual basado en calderas.

1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Analizar el entorno climático y litológico del edificio.
- Estimar el potencial térmico entregable por el subsuelo.
- Cuantificar la demanda térmica existente en la facultad de ingeniería.
- Calcular y dimensionar el sistema de captación geotérmico
- Analizar económicamente el sistema geotérmico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Geotermia

Geotermia es una palabra de origen griego, que deriva de “geos” que quiere decir tierra, y de “thermos” que significa calor: el calor de la tierra. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que intentan explotar ese calor para producir energía eléctrica y/o calor útil para el ser humano.

El Consejo Europeo de Energía Geotérmica define energía geotérmica como “la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra”. Esta energía engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas cualquiera sea su temperatura, profundidad y procedencia.

Las principales fuentes de la energía geotérmica según Pous & Jutglar (2004) son las siguientes:

- Se estima que cerca del 50% del flujo total de calor procede de la desintegración de isótopos radiactivos de larga vida presentes en la corteza y el manto. Los principales son ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th y el ^{40}K .
- El calor inicial o energía liberada durante la formación de la Tierra, hace 4500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie.
- La energía liberada por los movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra, principalmente entre el manto y el núcleo.
- La energía liberada en la continua cristalización del núcleo externo fluido, también llamada calor latente de cristalización. El núcleo interno se encuentra en estado sólido y el núcleo externo, en estado líquido, así en la zona de transición el fluido del núcleo externo está cristalizando continuamente y los elementos más ligeros migran liberando energía gravitatoria. En este proceso, el núcleo interno aumenta su tamaño a razón de $100\text{ m}^3/\text{s}$ y se libera energía en forma de calor.

2.2 Propagación del calor.

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son: conducción, convección y radiación.

Conducción es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes. Puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases, aunque es característica de los sólidos, puesto que en gases y líquidos siempre se producirá convección simultáneamente.

Convección es el modo en que se transfiere energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Este comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido provocado por las diferencias de densidad del mismo. Las partículas más calientes del fluido y, por tanto, menos densas, ascienden desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad, debido a que son más densas, y estas, posteriormente al calentarse, son empujadas otra vez hacia arriba.

Radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de átomos o moléculas. Radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los materiales a temperatura superior al 0 absoluto emiten radiación térmica. Los más calientes radian más que los más fríos. Cuando una radiación electromagnética choca con un material, sus moléculas se mueven más deprisa, calentando el material.



Figura 1: Ejemplo de los medios de propagación del calor dentro de una vivienda calefaccionada por un radiador. El fluido caliente dentro del radiador calienta por conducción las paredes de este. Una parte de la energía se emite por radiación si la temperatura superficial supera los 70°C . El aire alrededor del radiador se calienta por convección disminuyendo su densidad y al pesar menos que el aire, fluye hacia arriba. Parte del calor escapa a mediante conducción a través de las paredes y techo de la vivienda. Una vez que el aire

cede su energía se vuelve denso fluyendo hacia abajo. Imagen recuperada de <https://commons.wikimedia.org/>.

2.3 Recursos geotérmicos

Un recurso geotérmico es aquella parte de la energía geotérmica que puede ser utilizada por el hombre (Pous & Jutglar, 2004). Estos recursos se presentan de diversas formas dependiendo de las condiciones concretas del recurso. Según la temperatura del fluido los recursos pueden ser:

Recursos de alta entalpía: En zonas volcánicas o de subducción de placas tectónicas se producen a veces yacimientos de agua/vapor de muy alta energía y temperatura (150-300°C), estos se encuentran a profundidades comprendidas entre los 500 y 1500 m, por su alta calidad se suelen destinar a producción de electricidad en ciclos de turbina de vapor.

Recursos de media entalpía: En zonas similares también pueden originar yacimientos de media entalpía, con temperaturas entre 100 y 150°C, que se suelen destinar a la producción eléctrica en turbinas de ciclo binario.

Recursos de baja entalpía: estos recursos cuentan con temperaturas entre 30 y 100°C no poseen la suficiente energía para que sea viable la generación eléctrica, además no es viable su transporte a grandes distancias, por lo que solo son utilizables si los centros de consumo están cerca de la explotación. Se suelen destinar a usos turísticos como baños y piscinas termales, calefacción, piscifactorías, invernaderos, etc.

La existencia de los recursos anteriormente descritos depende de condiciones geológicas básicas como: la existencia de un flujo de calor elevado proveniente una fuente de calor como una intrusión ígnea, la presencia de acuíferos a una profundidad no superior a los 2 km que permita la acumulación y circulación de agua y/o vapor, una roca impermeable por encima del acuífero que actúe de cobertura e impida su fácil escape.

Estas condiciones solo están localizadas en puntos concretos del planeta, por lo que su aprovechamiento es local. Sin embargo, existe un recurso geotérmico presente en todo el planeta denominado recurso de muy baja entalpía, con temperaturas bajo los 30°C.

2.4 Geotermia de muy baja entalpía

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre constituye un extenso yacimiento de recursos de muy baja entalpía que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua continentales o marinas (Tester *et al.*, 2006).

La geotermia de baja entalpía a veces es llamada geotermia solar, debido a que en los primeros metros del suelo el principal aporte energético proviene de la energía solar alrededor de $2 \times 10^{17} \text{ W}$, mientras que la energía proveniente desde el interior de la tierra alcanza una potencia promedio de $4.2 \times 10^{13} \text{ W}$ (Pous & Jutglar, 2004).

Estudios (Ericsson, 1985) han demostrado que las variaciones en las condiciones atmosféricas debido a las estaciones del año solo afectan la temperatura de los primeros 15 metros bajo la superficie. Bajo estos primeros metros la temperatura se estabiliza y aumenta con la profundidad debido al gradiente geotérmico

de la tierra, esta varía alrededor del planeta y normalmente se encuentra en el rango de 0.5 a 3 °C cada 100 m (Gehlin, 2002).

Respecto al gradiente geotérmico y exceptuando las zonas con actividad geotérmica inusual, pueden diferenciarse tres profundidades típicas. Hasta una profundidad de unos 10-15m, la temperatura del terreno está básicamente determinada por el intercambio térmico con la atmósfera y el sol. Por debajo de esta cota y hasta profundidades de unos 60-80m existe una zona neutra en la que la temperatura se mantiene prácticamente constante. Finalmente, bajo esta profundidad suele establecerse ya un gradiente geotérmico claro y la temperatura se incrementa con la profundidad, aunque puede haber alteraciones relacionadas con las aguas subterráneas, existencia de sistemas kársticos, etc. (IDAE, 2012).

La tierra posee una capacidad térmica alta y, por lo tanto, las variaciones de temperatura se producen más lentamente que en la atmósfera, de manera que el calor acumulado durante el verano puede ser utilizado durante el invierno, siendo esta temperatura mayor que la del ambiente en invierno y menor en verano (Conde et al., 2009).

2.5 Bombas de calor geotérmicas

Para el aprovechamiento de los recursos de muy baja entalpía es necesario el uso de las bombas de calor geotérmicas. Naturalmente el calor fluye desde las regiones de alta temperatura a las de baja temperatura. Dicho proceso de transferencia de calor ocurre sin que se requiera la participación de algún dispositivo. El proceso inverso, sin embargo, no sucede por sí solo. La transferencia de calor de una región de temperatura baja a otra de alta temperatura requiere de dispositivos especiales llamados refrigeradores o bombas de calor.

Los refrigeradores y bombas de calor son esencialmente lo mismo, solo difieren en sus objetivos. El objetivo de un refrigerador es mantener un volumen a una temperatura baja al extraer el calor de él y descargando este calor a un medio de temperatura alta, sin ser este su propósito. El objetivo de una bomba de calor es mantener una dependencia calentada a cierta temperatura. Esto se logra al absorber calor de una fuente de baja temperatura, como el agua de un pozo o el aire frío en el invierno, y al suministrar este calor a un medio más caliente, como una casa. Cuando se realiza la transferencia de calor en sentido inverso, ósea, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, la bomba de calor trabaja en modo refrigeración (Cengel & Boles, 2011) (IDAE, 2012).

Las bombas de calor se pueden clasificar en función del estado y tipo de fluido con el que intercambian calor con el medio ambiente y la vivienda. Esta denominación se debe al siguiente criterio: En primero lugar se indica el tipo de fuente o sumidero de calor del exterior (Foco frío) y, en segundo lugar, la naturaleza del fluido con la que se va distribuir el calor o la refrigeración en el interior del local (Foco caliente).

Los principales tipos son:

-Bombas de calor aire-agua: también denominadas aerotermia, estas extraen energía del aire exterior para convertirlo en frío, calor o agua caliente sanitaria en la vivienda.

-Bombas de calor agua-agua: estas intercambian calor tanto con el exterior como con el interior mediante un circuito de agua.

-Bombas de calor agua-aire: estas extraen energía del exterior mediante un circuito de agua y la ceden al interior a través del aire, por ejemplo, a través de los fancoils.

Las bombas de calor geotérmicas suelen ser una bomba de calor agua-agua o agua aire. Los focos fríos, suelen ser agua o suelo. Se denomina agua, cuando los colectores en el subsuelo están en contacto con aguas subterráneas. Los sistemas de colectores serán definidos en detalle más adelante. Los focos calientes pueden ser agua o aire. Se denomina agua para la calefacción por radiadores, suelo radiante, generación de agua caliente, etc. En el caso de aire, la climatización del local es por medio de aire. Estos sistemas de distribución serán definidos en detalle más adelante

En general una instalación con bomba de calor geotérmica funciona con 3 circuitos (Figura 2):

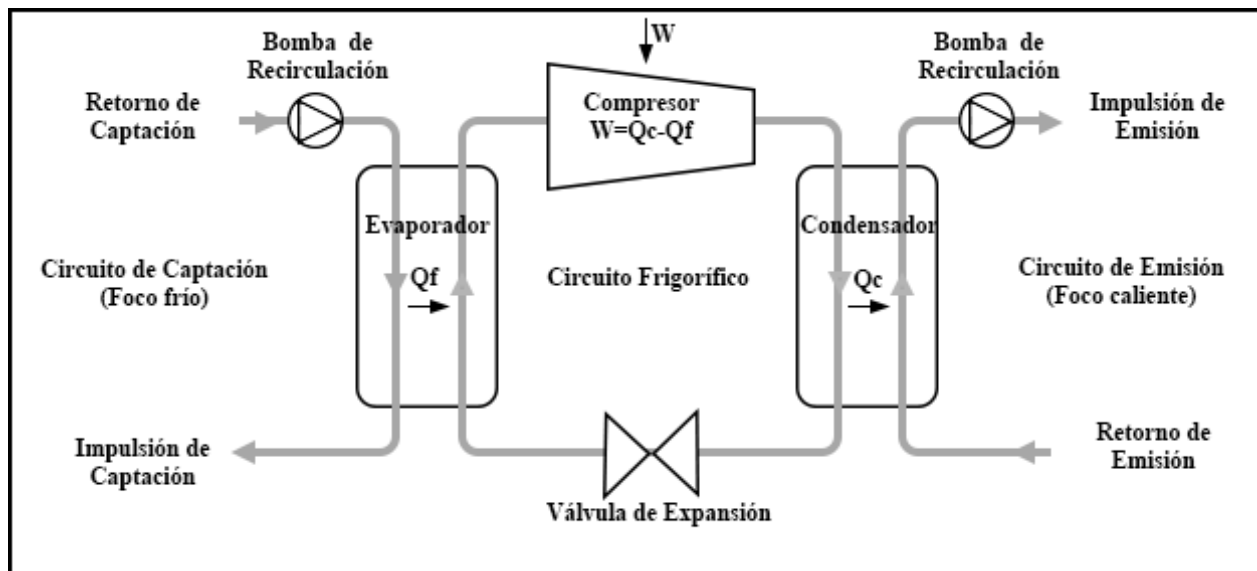


Figura 2: Funcionamiento básico de una bomba de calor en modo calefacción. Elaboración propia.

Circuito de captación: Corresponde al círculo desde el cual se capta la energía del medio (Foco frío) a una temperatura T_F . La bomba de calor hace circular una mezcla de agua y anticongelante llamado glicol mediante una bomba circulatoria. Existen diferentes configuraciones para los circuitos de captación dependiendo del medio que se quiere aprovechar y se describen en detalle en los siguientes capítulos.

Circuito frigorífico: Se trata de un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante. Está compuesto de 4 elementos principales que en modo calefacción funcionan de la siguiente manera:

1. Evaporador. El evaporador es un intercambiador de calor, en el cual la mezcla glicolada intercambia la energía absorbida (Q_f) en el sistema de captación al refrigerante contenido en el circuito frigorífico. Dicha energía es suficiente para provocar el calentamiento y ebullición del refrigerante.

2. Compresor. El fluido ahora calentado pasa por el compresor donde aumenta su presión aportando un trabajo (W), con esto se consigue un nuevo aumento de su temperatura, la que va a ser aprovechada en la siguiente etapa.
3. Condensador. El condensador es otro intercambiador de calor. Aquí el refrigerante en fase gas y a alta temperatura que sale del compresor, cede su energía (Q_c) al agua que circula por el circuito de emisión, aumentando la temperatura de esta y permitiendo la generación de calor. El fluido a la salida del condensador vuelve a fase líquida.
4. Válvula de expansión. Para completar el ciclo es necesario que el fluido pase por la válvula de expansión, donde la presión y por lo tanto la temperatura del refrigerante se ven bruscamente reducidas, volviendo así a las condiciones necesarias para que sea posible reiniciar el ciclo de absorber calor en el evaporador.

En modo refrigeración, el sentido del ciclo es el inverso.

Circuito de emisión: Corresponde al circuito que entrega el calor a la vivienda (Foco caliente) a una temperatura T_C . La bomba de calor hace circular el agua caliente por el sistema de emisión mediante una bomba de recirculación para climatizar el recinto. Una vez que se cede el calor al recinto el agua dentro del circuito regresa al condensador para nuevamente obtener energía y continuar el ciclo. Los principales sistemas de emisión se describen en detalle en los capítulos siguientes.

El rendimiento térmico de una bomba de calor η se expresa en función de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{W}{Q_c} \quad (1)$$

Donde: Q_c es la cantidad de energía cedida por el sistema al foco caliente, Q_f la cantidad de energía recibida por el sistema del foco frío, y W el trabajo mecánico neto del compresor.

Si la bomba de calor está trabajando en modo calefacción, el rendimiento se define como la relación entre calor aportado de calefacción respecto al consumo eléctrico total del compresor. Este rendimiento se conoce como COP (Coefficient of performance). Según su definición se expresa como sigue:

$$COP = \frac{Q_c}{P} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (2)$$

Donde: Q_c es la potencia de calefacción (también llamada potencia de caldeo) aportada por la bomba de calor, y P el consumo eléctrico total (valor superior a W , debido a que incluye factores del rendimiento del compresor), T_F corresponde a la temperatura a la que la bomba de calor capta la energía desde el foco frío y T_C corresponde a la temperatura a la que la bomba de calor entrega la energía al foco caliente.

El COP especifica el rendimiento instantáneo de una bomba de calor en unas condiciones específicas. Sin embargo, durante un año de funcionamiento, las condiciones de demanda energética y del ambiente van cambiando, por eso se hace necesario definir un coeficiente que califique el rendimiento de la bomba de calor teniendo en cuenta todos sus estados de funcionamiento. Se define el SPF (Seasonal performance

factor), o factor de rendimiento estacional, como la ratio entre la energía útil aportada por la bomba de calor durante todo su periodo de funcionamiento anual, respecto a la energía eléctrica consumida para hacerla funcionar.

$$SPF = \frac{\text{Energía util proporcionada por la bomba de calor}}{\text{Energía consumida}} \quad (3)$$

Las BCG son más eficientes que las de aire debido a la estabilidad de la temperatura del terreno frente a las fluctuaciones de la temperatura ambiental, tanto estacional como diaria. También son más eficientes que los sistemas de calefacción y refrigeración habituales. Típicamente en modo calefacción, por cada 1 kWh de trabajo del compresor, se introducen al local 4,5 kWh de calor, de los cuales 3,5 kWh constituye energía “gratuita” proveniente del terreno. Si se compara con una caldera a gas, económicamente al operar los equipos, en la caldera a gas habría que pagar los 4,5 kWh térmicos de combustible, mientras que en la bomba de calor se paga únicamente el kWh eléctrico consumido (Conde *et al.*, 2009)

2.6 Circuitos de captación geotérmicos

Existen diferentes configuraciones para los circuitos de captación o intercambiadores terrestres, los principales se explican a continuación:

2.6.1 Cimientos geotérmicos

Corresponden a pilotes, pantallas subterráneas, muros de contención y losas fabricadas con hormigón armado que, además de su función resistente o de sostenimiento de taludes, se emplean como intercambiadores de calor con el terreno al llevar insertados tubos de polietileno por los que circula un fluido caloportador, que se conecta en circuito cerrado con bombas de calor situadas en los centros de climatización de los edificios que sustentan (Llopis *et al.*, 2009).

2.6.2 Pozos abiertos

Este tipo de circuito está asociado a fuentes de agua subterránea. Generalmente se necesitan dos pozos, un pozo de producción del que se extrae el agua, esta es bombeada hasta el intercambiador térmico en la bomba de calor donde se le extraen en promedio 5° C de temperatura, luego esta agua es dirigida a un pozo de inyección. Para que el sistema sea renovable los pozos están separados una distancia suficiente como para no afectarse, entre 10 a 15 m (Grimm, 2015). Se requieren una permeabilidad suficiente para poder extraer un caudal adecuado con poca subsidencia y buena calidad de agua para evitar corrosión, atascos y desgaste de tubos por lo que es un sistema poco disponible.

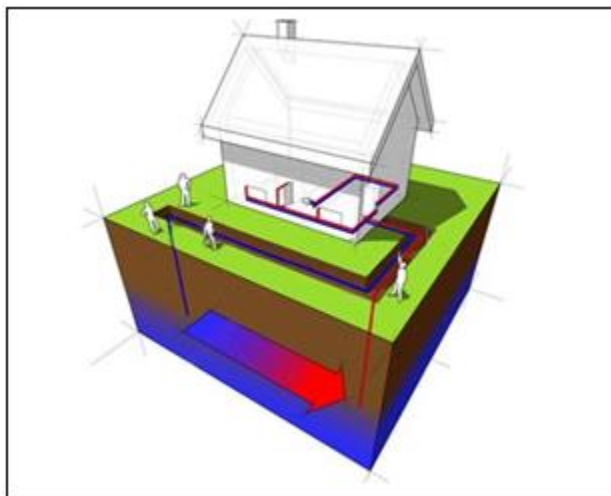


Figura 3: Esquema de un circuito de pozos abiertos. La tubería colectora extrae el agua y la envía al intercambiador de la de calor de la bomba de calor, luego la retorna a una cierta distancia de su origen. Imagen recuperada de <https://energiaverdebcn.wordpress.com>.

2.6.3 Colectores horizontales

Estos sistemas están formados por un conjunto de tubos extendidos horizontalmente en el subsuelo (figura 4a), los colectores van enterrados a poca profundidad, normalmente entre 60 cm y 1,2 m bajo la superficie, se recomienda que esta profundidad sea 20 cm bajo la cota de cero grados en el subsuelo a modo de evitar la congelación del fluido caloportador (Grimm, 2015). La distancia horizontal entre tubos suele ser de 50 cm. En este tipo de sistemas el mecanismo más importante para renovar la temperatura del terreno es la radiación solar, por lo que no se debe construir nada encima de la superficie bajo la que estén los colectores. Requiere por lo tanto un mayor uso del terreno.

La superficie de terreno necesaria para instalar un intercambiador horizontal depende de las necesidades de calefacción y refrigeración del edificio, de la profundidad a la que se coloque el bloque, de la naturaleza del suelo, de la cantidad de humedad que contenga, del clima, de la eficiencia de la bomba de calor y de la configuración del bucle. Por ejemplo, para una vivienda unifamiliar bien aislada térmicamente, se necesita una superficie de terreno de 1,5 veces la superficie habitable a calentar. Si la vivienda es antigua y está mal aislada térmicamente, la superficie necesaria puede alcanzar hasta 3 veces.

Es el tipo de instalación con mejor relación coste – prestaciones. Como cifra aproximada se recuperan del orden de 30 W por m^2 de terreno y de 10 a 15 W por metro de tubo. Cuando existen restricciones de espacio, o para aprovechar mejor la superficie libre, se suele recurrir a esquemas con conexiones en serie o paralelo con mayor densidad. Algunos de estos esquemas son: los sistemas con lazos paralelos en zanja, los colectores en espiral horizontal (Slinky) o en espiral vertical (Svec).

La configuración “Slinky” consiste en disponer la tubería formando bucles o espiras, con esto se logra instalar la mayor longitud de intercambiador con la menor excavación posible (Figura 4e). Dependiendo del terreno disponible esta configuración se puede disponer horizontal o vertical (IDAE, 2012).



Figura 4: a) Ilustración esquemática de un sistema de captación horizontal (Uponor, 2013 p24), b) Perfil del lecho de captación horizontal según la norma VDI 4640 (Uponor, 2013 p30), c) Instalación de colectores horizontales (Uponor, 2013 p25), d) Intercambiador horizontal de lazo simple (IDAE, 2012 p27), e) Intercambiador horizontal en bucles de tipología “Slinky” (IDAE, 2012 p28).

2.6.4 Sondas geotérmicas verticales

Una sonda geotérmica vertical es un intercambiador de calor instalado en el interior de un sondeo vertical de 10 a 16 cm de diámetro (figura 5a). Está formado por tubos verticales, generalmente de polietileno, unidos en el fondo del sondeo por el pie de sonda, y el material que rellena el espacio anular entre los tubos y las paredes del sondeo.

Las sondas geotérmicas verticales aseguran aún más la estabilidad de la temperatura del foco frío, ya que profundizan abajo de la zona influenciada por los cambios de temperatura externos. Por otra parte, el sondeo vertical asegura que haya suficiente superficie de intercambio. Como cifra estimativa se recuperan del orden de 50 W por metro de sondeo. Los sondeos suelen alcanzar profundidades entre 20 y 200 m (Conde *et al.*, 2009). La energía térmica potencial entregada por metro de sonda depende, fundamentalmente de la naturaleza de las rocas encontradas a lo largo del sondeo y de la presencia de agua subterránea. (Llopis *et al.*, 2009)

Los sondeos geotérmicos consisten en varias perforaciones verticales entubadas en sus primeros 6 m, para mantener la estabilidad del pozo. Para mejorar la transmisión de calor a los tubos y aumentar la consistencia, la perforación se sella con un relleno geotérmico a través de un tubo central provisorio, esta es una mezcla especial de bentonitas con alto contenido de sólidos que al mezclarse con arena forma un mortero de relleno conductor de la tempera. La utilización del relleno es indispensable para la protección de acuíferos, evita la infiltración de aguas superficiales, aumenta la transferencia de calor entre la roca del suelo y la sonda, estabiliza el pozo y protege las sondas geotérmicas (Grimm, 2015).

En superficie las sondas verticales se unen a colectores horizontales (figura 5e), tendidos sobre el terreno a baja profundidad, para completar un circuito cerrado que recorre el fluido caloportador hasta la BCG en el edificio. La misión de estos colectores horizontales es únicamente transportar el fluido hasta los 2 colectores principales que van y vienen de la bomba de calor, por lo que cuanto mayor es su longitud mayor son las pérdidas de carga por rozamiento, de ahí la importancia de situar las sondas geotérmicas lo más cerca posible al inmueble.

En la figura 6 podemos apreciar los tipos de sondas geotérmicas más utilizadas, estas son:

- Simple U: consta de 2 tubos, generalmente de polietileno, unidos en su extremo inferior por una pieza del mismo material, llamado el pie de sonda.
- Doble U: Corresponde 2 sistemas simple U introducidos en un mismo sondaje, de forma perpendicular.
- Coaxial: Corresponde a un conducto formado por 2 tubos concéntricos: un tubo interior y exterior. El fluido baja por el tubo interior y sube por el exterior.

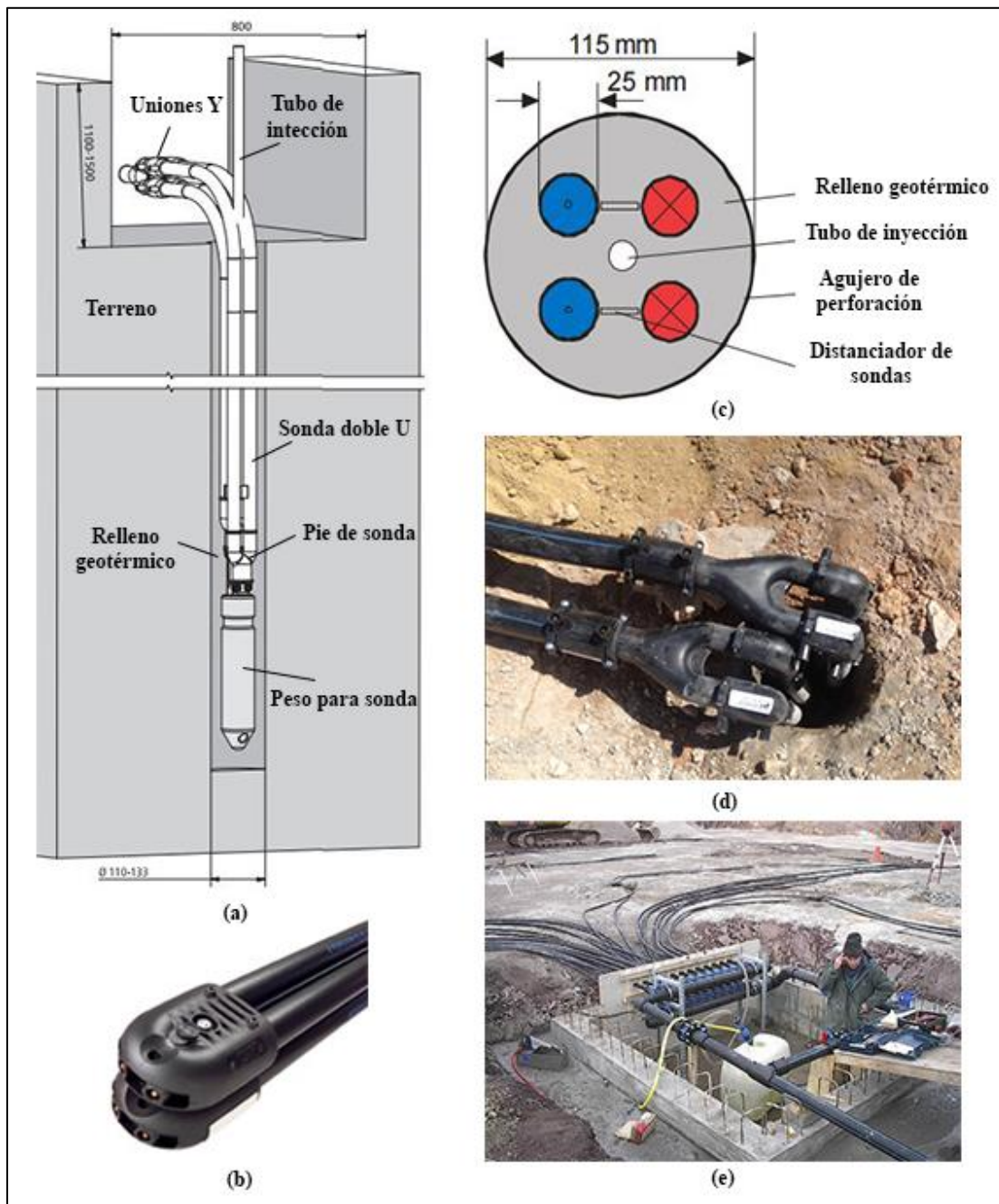


Figura 5: a) Perfil de un pozo geotérmico con sonda doble U (ALB Geotherm, 2008 p5), b) Detalle del pie de sonda geotérmica Energeo 32 PE-100 (Enertres, 2014 p46), c) Corte transversal de un pozo geotérmico, d) Detalle de las uniones en Y de una sonda doble U (Groenholland), e) Sistema de conexiones horizontales entre los pozos geotérmicos y los colectores principales (Groenholland).

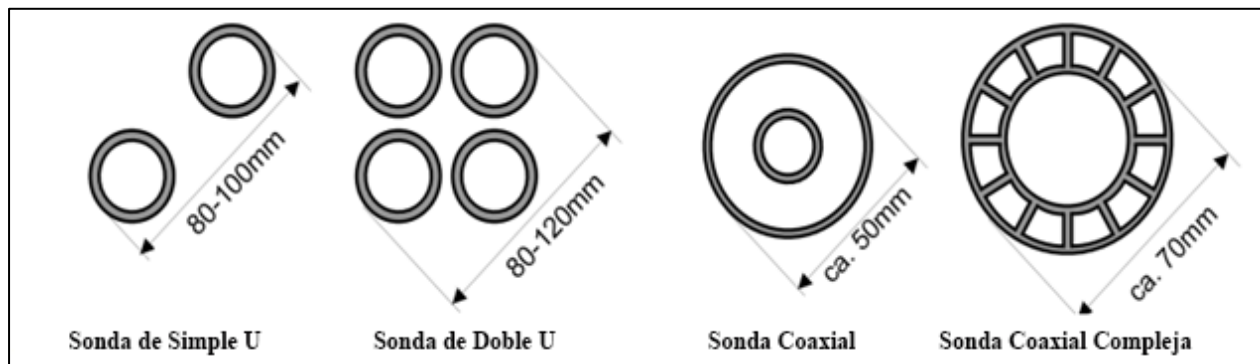


Figura 6: Cortes transversales de los tipos de sonda geotérmica más utilizados. Recuperado de <https://www.geoener.es>.

Los tubos generalmente son de polietileno, existen 2 tipos, los de baja densidad identificados por las siglas PE, y de alta densidad denominados PEAD o PEHD. Ambos tipos de tubos no son tóxicos, son inertes al contenido e impermeables. La diferencia es la mayor dureza, tenacidad y rigidez en los tubos de alta densidad, por lo que también son más costosos.

Los diámetros exteriores (DN) de estas tuberías de polietileno están normalizados a 16, 25, 32 y 40mm, siendo los más utilizados los DN 40 para sondeos simple U y los DN 32 para sondas doble U. Los espesores para un mismo diámetro pueden ser diferentes y se identifican con las siglas SDR. El SDR corresponde a la relación entre el DN y el espesor del tubo. Además, se indica la presión nominal de trabajo (PN) medida en bares

2.7 Sistemas de distribución del calor

Existen distintas tecnologías para la climatización, entre las que se encuentra el empleo de la bomba de calor, sin embargo, esta para intercambiar la energía captada del terreno con el recinto se combina con otros sistemas de climatización, los más utilizados junto a la bomba de calor son:

2.7.1 Ventilconvector o aerotermo:

Consiste en una batería de tubos con aletas, por el interior de los tubos se hace circular agua caliente y por el exterior circula aire frío impulsado por un ventilador. Esta fuerza la convección, lo que aumenta la transferencia de calor (Pous & Jutglar, 2004), esto permite que este sistema trabaje con aguas a temperaturas relativamente bajas, del orden de 60°C o incluso menos, sin la necesidad de recurrir a superficies de intercambio excesivamente grandes.

2.7.2 Radiador:

Están constituidos por un haz de tubos en paralelo y ligeramente aleteados rodeados de una coraza construida en acero o fundición de aluminio. El agua circula por el interior de los tubos, mientras que el aire circula por el exterior del radiador, en convección natural.

El calor se transfiere por radiación y convección, y como la superficie no es grande, la temperatura del agua de alimentación suele ser elevada, del orden de 80 a 90°C. Los sistemas de radiadores tradicionales no son adecuados para trabajar a temperaturas más bajas, puesto que obliga a instalar grandes paneles, lo que lleva a un sobredimensionamiento de la instalación (Pous & Jutglar, 2004). Sin embargo, ahora existen radiadores eficientes de baja temperatura, por ejemplo, los modelos con la tecnología “*LOW H₂O*” estos permiten funcionar con bombas de calor de baja temperatura, en rangos que van entre los 35° y 55° C como máximo sin necesitar superficies tan grandes como los radiadores tradicionales.

2.7.3 Suelo radiante:

Es el sistema habitual de climatización asociado a las BCG. Consiste en enterrar en el suelo del recinto los tubos por los que circula el agua caliente, generalmente de polietileno reticulado. Esto mejora el comportamiento térmico de la instalación, los tubos se instalan sobre una manta de aislante térmico, para evitar que el calor se disipe hacia abajo. Sin embargo, se puede prescindir de esta capa aislante cuando el suelo es un forjado situado entre plantas habitadas.

La distribución de temperatura superficial del suelo depende del espaciado entre tubos, la profundidad a que estén enterrados y la temperatura de circulación del agua. Se busca que esta configuración consiga temperaturas que no provoquen molestias a los usuarios.

El sistema genera una distribución de calor inversa, de forma que la temperatura va disminuyendo conforme se separa del suelo, al contrario de lo que ocurre en la calefacción por aire caliente (Conde *et al.*, 2009).

La gran ventaja de este sistema frente a los antes vistos es que se puede trabajar con temperaturas de agua muy bajas, del orden de 35°C, lo que implica en un menor consumo energético.

Sin embargo, el suelo radiante funciona bien en aquellos ámbitos donde la ocupación es muy estable, y donde no es necesario responder a variaciones bruscas en la ocupación, por ejemplo, una residencia de ancianos. En España está contraindicado utilizar suelo radiante en centros educativos infantiles, primarios y secundarios, excepto universidades. Esto se debe a que en sectores como salas de clases, que pasan de estar vacíos a ocupados, la inercia de la instalación no permite adaptarse a las variaciones de la demanda, por lo que no resulta en una instalación funcional (Higon, 2017).

Para cubrir con geotermia las demandas energéticas de estos recintos, resulta más adecuado utilizar fancoils de pared con la capacidad de distribuir aire frío o caliente. Debido a la que este sistema tiene una inercia baja en comparación con el suelo radiante, esto le permite responder a variaciones bruscas de la demanda debida a cambios repentinos en la ocupación.

2.8 Propiedades térmicas del terreno

El comportamiento del terreno respecto a su capacidad de almacenar calor y transmitirlo es esencial para el aprovechamiento energético, este depende tanto de la temperatura del terreno como de la capacidad del mismo de transmitir o absorber el calor de los ciclos de calefacción o refrigeración del sistema.

La transferencia de calor entre el fluido caloportador dentro de la sonda y el suelo alrededor de esta depende la disposición de los canales de flujo, de la transferencia de calor por convección en los ductos y de las propiedades térmicas de todos los materiales envueltos en el proceso térmico.

Las propiedades térmicas más importantes de suelos, rocas y materiales de la sonda son la conductividad térmica, la resistencia térmica y la capacidad térmica volumétrica.

La **conductividad térmica** es la cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras. Se expresa en $[W/m K]$ (Nch853 of 2007). Esta se deriva de la Ley de Fourier, esta explica el transporte de energía por conducción que se establece en una barra debido a la diferencia de temperaturas (δT) entre 2 puntos de la misma (δx). La Ley de Fourier afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía J y el gradiente de temperatura $\delta T / \delta x$.

$$J = K \frac{\delta T}{\delta x} \quad (4)$$

Donde K es una constante característica del material denominada conductividad térmica.

La **resistencia térmica** es la función inversa de la conductividad térmica ósea la capacidad del material para oponerse al flujo de calor. Se expresa en $[m K/W]$ (Nch853 of 2007). En el caso de la sonda geotérmica las resistencias térmicas importantes son las de todos los materiales entre el fluido caloportador y el terreno

Cuanto menor es la resistencia térmica de la perforación geotérmica o pozo (R_b), mayor es la transferencia de frío o calor. Esta resistencia indica la pérdida de temperatura durante el proceso de transferencia de energía desde el terreno hasta el fluido caloportador en inglés “brine”. Los factores que influyen en la resistencia térmica del pozo son: el diámetro del pozo, la conductividad térmica del material de relleno y el tipo de sonda vertical (Uponor, 2013).

De esta manera la resistencia térmica del captador vertical está dada por la siguiente ecuación:

$$R_b = R_c + R_s + R_v \quad (5)$$

Donde:

R_c , es el coeficiente transferencia de calor entre el brine y la sonda.

R_s , es el coeficiente de transferencia de calor de la sonda vertical.

R_v , es el coeficiente de transferencia del calor del material de relleno.

Otra resistencia térmica importante de considerar es la resistencia que ofrece el terreno alrededor del sondaje hasta una distancia en la que se el terreno conserve su temperatura promedio ósea sin perturbaciones térmicas (Hellstrom, 1998).

La **capacidad térmica volumétrica** es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 m^3 de terreno en 1 grado Kelvin. Se expresa en $[\text{J}/\text{m}^3\text{K}]$.

La única forma precisa de conocer estos valores en cada terreno es experimentalmente a través de un Test de Respuesta Térmica (TRT) en uno o varios sondeos piloto. Consiste en medir la variación de temperatura al interior del tubo de la sonda geotérmica para lograr una imagen exacta de las temperaturas encontradas a lo largo del mismo. Luego se utilizan programas informáticos para el diseño de la matriz de sondeos y para simulación dinámica, que permiten tener en cuenta posibles interferencias entre los sondeos.

3. METODOLOGIA

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo se basará en la norma española UNE100715-1. Esta establece que los datos mínimos de partida, criterios de dimensionamiento y los procedimientos necesarios para instalaciones geotérmicas de baja entalpia.

La información mínima que recoger debe ser la litología que se prevé atravesar. Puede realizarse basándose en la cartografía geológica publicada siempre y cuando la escala geológica empleada no sea inferior a 1:50000 y/o a partir de fuentes contrastadas como informes, publicaciones o estudios cercanos al punto de perforación. El dimensionamiento de la instalación puede realizarse utilizando los datos de la tabla F.1 de conductividades, incluida en el anexo, donde aparecen valores de referencia para distintas litologías.

Además, son necesarios los siguientes datos energéticos del edificio:

Tabla 1: Datos necesarios del edificio. Fuente UNE100715-1.

Sistema	Datos necesarios
Refrigeración	Potencia térmica pico [kWt]
	Energía demandada anualmente [kWht]
	Curva de demanda/ Distribución mensual de la demanda
Calefacción	Potencia térmica pico [kWt]
	Energía demandada anualmente [kWht]
	Curva de demanda/ Distribución mensual de la demanda

3.1 Litología y propiedades térmicas del terreno

Conocer el tipo de materiales presentes en el subsuelo es fundamental para estimar correctamente el valor de la conductividad térmica del suelo y su capacidad calorífica volumétrica, estos valores son claves para dimensionar correctamente un sistema de captación geotérmico. La única forma de conocer su valor exacto a través de un (TRT) además no existe un sondaje que alcanzara profundidades superiores a 100m para

conocer exactamente la litología. Sin embargo, la Universidad realizó varios sondeos con profundidades máximas de 30m, con esta información y el estudio de los mapas geológicos de la ciudad de Concepción se estimará la litología presente bajo la facultad.

Las unidades geológicas predominantes en el sector de acuerdo con el mapa geológico general de Concepción de Galli y Lemke (1965), corresponde principalmente a rocas sedimentarias detríticas. Aunque también es posible encontrar en sectores bajos y húmedos arenas coluviales producto de la meteorización de las rocas sedimentarias clásticas. Además, existe presencia de arenas finas y limos. Las rocas detríticas comprenden areniscas y lutitas estratificadas. La arenisca es una arena fina cementada y la lutita está conformada por elementos aún más finos de limo y arcilla los cuales han sido altamente compactados.

Además, el mapa de geología y suelo de fundación de la ciudad de Concepción del SERNAGEOMIN nos detalla que bajo el edificio de la facultad de Ingeniería se encuentran presentes las siguientes unidades geológicas:

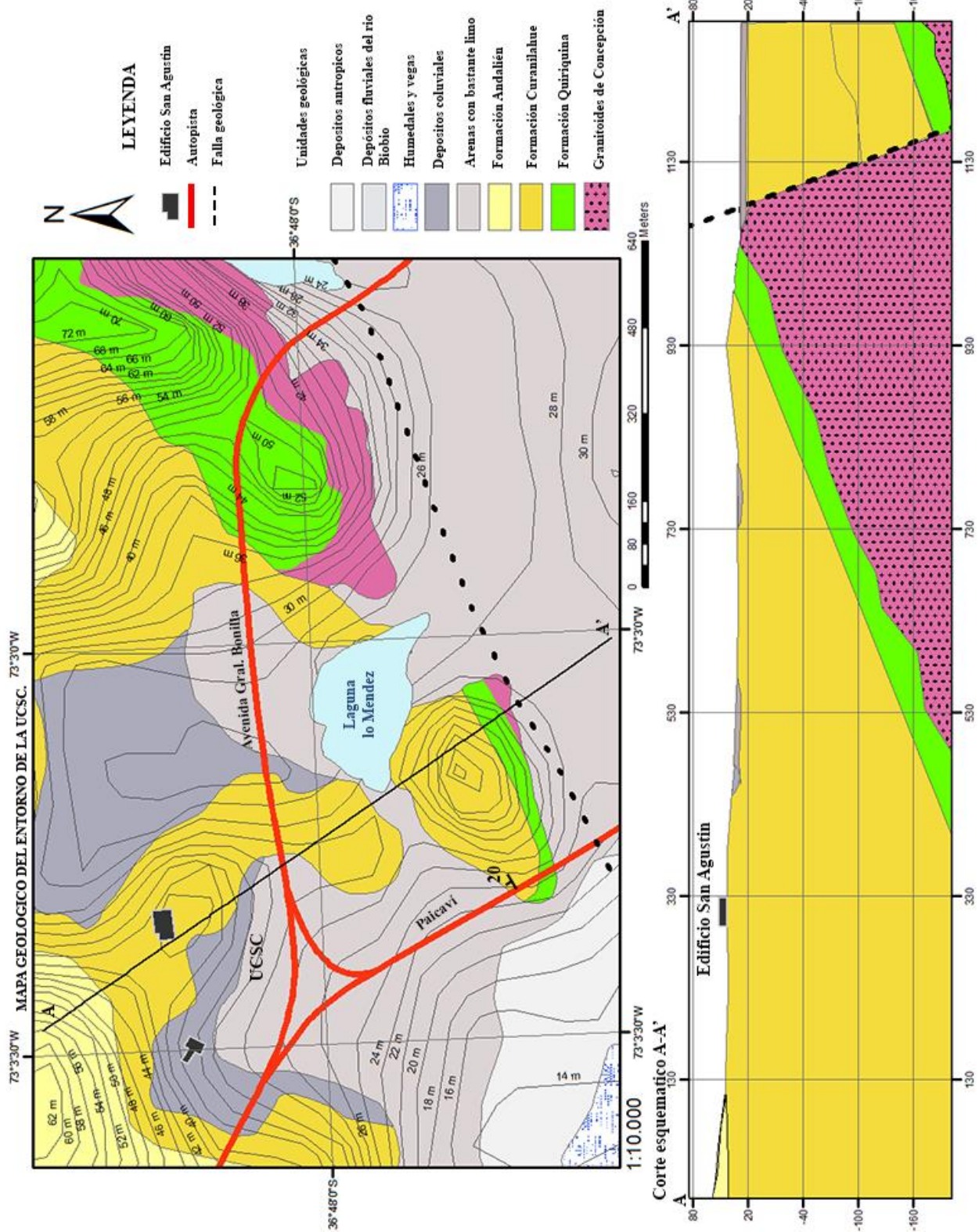
Granitoides de Concepción (Pzg) (Paleozoico Superior): Corresponde como rocas graníticas que afloran en los cerros islas existentes en la ciudad de Concepción, y en la ladera sur del cerro Lo Galindo. Este compuesto de tonalitas, granodioritas y granitos subordinados (Quezada, 1996). En general estos afloramientos se encuentran completamente meteorizados, y los feldespatos descompuestos a arcillas y limos. Este suelo residual se denomina maicillo. Estratigráficamente la base y yacente de la unidad se desconocen (Galli, 1965)

Formación Quiriquina (Ksq) (Maastrichtiano): (Steinmann, 1985, en Quezada, 1996)). Corresponde a una secuencia sedimentaria de origen marino, con abundante contenido fosilífero. Está formada de areniscas, conglomerados y calciruditas fosilíferas, con cemento calcáreo y niveles de concreciones. En la ciudad de Concepción la Formación Quiriquina sobreyace discordantemente los Granitoides de Concepción. En el corte del cerro Chabuco, se observa una disposición homoclinal de rocas cretácicas de la formación Quiriquina con rumbo N55°E y manteo 20°NW (Quezada, 1996)

Formación Curanilahue (Palc) (Paleoceno superior-Eoceno inferior): (Muños Cristi, 1946, en Quezada, 1996)). Corresponde a describe una secuencia de areniscas amarillentas con mantos de carbón, que sobreyace en discordancia de erosión a la Formación Quiriquina. En el sector en que se emplaza la U.C.S.C Quezada (1996) la describe como secuencias de areniscas rojo-amarillentas, muy meteorizadas, lo que habría generado abundante material arcilloso. En algunos lugares la Formación Curanilahue es sobre yacida por depósitos más recientes poco consolidados, dispuestos horizontalmente. La estratificación observada por Quezada en el cerro Lo Galindo, presenta un rumbo entre N40°E y N60°E, y mateos de 18° y 20° al W. La formación está formada de areniscas, arcosas líticas y lutitas, intercaladas con matos de carbón y niveles conglomeraticos.

Formación Andalién (Plia) (Plioceno?): Compuesta de Areniscas, arcillolitas conglomeradicas y conglomerados polimicticos, con clastos de filitas, esquistos micáceos, cuarcitas y rocas ígneas (Quezada, 1996).

Tomando como base la información anterior y el mapa geológico del SERNAGEOMIN se elaboró el siguiente mapa geológico, donde se aprecia que el edificio de la facultad se encuentra sobre la formación Curanilahue, Además considerando los datos de rumbo y manteo (Quezada, 1996) se elaboró un corte esquemático de cómo se podría presentar el subsuelo bajo la universidad.



Además, existen varios sondeos realizados en el terreno de la universidad siendo 2 los más relevantes. El primero lo realizó el laboratorio de geomateriales el 3 de junio de 2011, entre los edificios de la facultad de Ingeniería y Ciencias. Alcanzo una profundidad de 30m y la napa freática se encontró a una profundidad $z_w = 0,83 \text{ m}$. El segundo sondeo fue realizado el 2 de septiembre de 2011, para la construcción del edificio “Monseñor Ricardo Ezzati” ubicado aproximadamente 130m al oeste del edificio de Ingeniería. El sondeo alcanzo una profundidad de 25m y la napa freática se encontró a una profundidad $z_w = 5,1 \text{ m}$.

Para el dimensionamiento del sistema de captación geotérmico se utilizará el software Earth Energy Designer (EED) debido a su prestigio dentro de las empresas europeas dedicadas a la climatización geotérmica, fue especialmente recomendado por Salvador Martínez ingeniero de proyectos de la empresa Energesis. El software cuenta con una base de datos de valores de conductividad térmica y capacidad calorífica volumétrica, según tipo de material del suelo. Esta se usó para clasificar la información de los sondeos y estimar un valor promedio ponderado de conductividad térmica y capacidad calorífica volumétrica según el espesor del estrato descrito.

Las tablas resumen la información de los sondeos, mapas geológicos y valores recomendados por el software EED. En base al corte geológico asumiremos que bajo los estratos superficiales se encuentra la Formación Curanilahue por lo menos hasta una profundidad de 160m. En base a la clasificación del software EED se considerará como arenisca para efectos de cálculos.

Debido a la incertidumbre del terreno a profundidades sobre 30m se optará por un criterio conservador escogiendo los valores promedio más desfavorables del sondeo 1. Así para efectos de cálculos la conductividad térmica del terreno será $2,182 \text{ [W/m K]}$, mientras que la capacidad calorífica volumétrica será $1,988 \text{ [MJ/m}^3 \text{ K]}$.

Tabla 2: Descripción del sondeo 1 y propiedades térmicas estimadas según la clasificación del software EED.

Horizonte N°	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del sondeo	Clasificación según EED	Conductividad recomendada [W/m K]	Capacidad calorífica volumétrica [MJ/m ³ K]
1	0,00 - 0,15	0,15	Capa vegetal.			
2	0,15 - 2,50	2,35	Arena fina algo arcillosa.	Arena húmeda	1	1,8
3	2,50 - 5,00	2,5	Arena fina con algo de arcilla, lentes de limo arenoso y gravas.	Arena húmeda	1	1,8
4	5,00 - 6,30	1,3	Maicillo, arena media a gruesa cuarzosa, lentes de limo	Arena húmeda	1	1,8
5	6,30 - 10,40	4,1	Arena fina limosa.	Arena húmeda	1	1,8
6	10,40 - 16,20	5,8	Arena muy fina o arcillosa.	Arena húmeda	1	1,8
7	16,20 - 19,62	3,42	Arcilla con vetas arenosas.	Arcilla húmeda	1,6	2,3
8	19,62 - 20,30	0,68	Arcilla gradualmente cementada.	Lutita	2,2	2,3
9	20,30 - 25,10	4,8	Arenisca arcillosa medianamente cementada.	Arenisca	2,3	2

10	25,10 - 31,37	6,27	Arena fina arcillosa algo cementada.	Arenisca	2,3	2
11	31,30 - 100	68,7	Formación Curanilahue.	Arenisca	2,3	2
Promedio ponderado:					2,182	1,9886

Tabla 3: Descripción del sondaje 2 y propiedades térmicas estimadas según la clasificación del software EED.

Horizonte N°	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del sondaje	Clasificación según EED	Conductividad recomendada [W/m K]	Capacidad calorífica volumétrica [MJ/m ³ K]
1	0,00 - 0,64	0,64	Relleno limo, arcilla, gravilla, arena.	Arcilla húmeda	1,6	2,3
2	0,64 - 2,60	1,96	Arcilla.	Arcilla húmeda	1,6	2,3
3	2,60 - 6,20	3,6	Limo arcilloso.	Limo húmedo	1,8	2,2
4	6,20 - 12,60	6,4	Maicillo, lentes de limo arenoso.	Limo húmedo	1,8	2,2
5	12,60 - 20,40	7,8	Arena levemente limosa.	Arena saturada	2,4	2,5
6	20,40 - 22,48	2,08	Limo arcilloso.	Arcilla húmeda	1,6	2,3
7	22,48 - 23,15	0,67	Carbón mineral.	Carbón	0,63	1,8
8	23,15 - 24,81	1,66	Limo algo cementado.	Lutita	2,2	2,3
9	24,81 - 25,18	0,37	Arcilla cementada.	Lutita	2,2	2,3
10	25,18 - 160	134,82	Formación Curanilahue.	Arenisca	2,3	2
Promedio ponderado:					2,256	2,038

3.2 Metodología de cálculo para la demanda energética

El cálculo de la carga térmica de calefacción se realizó siguiendo la metodología empleada por Muñoz (2017), en su trabajo sobre el comportamiento térmico del edificio San Agustín. Para esto se recurre a las ecuaciones propuestas por diversos autores y estas serán explicadas en detalle en el Anexo I. Cálculo cargas térmicas del edificio.

3.2.1 Condiciones climáticas de diseño

La ciudad de Concepción es una ciudad costera con clima mediterráneo con influencia oceánica y una breve estación seca en verano. Las temperaturas medias mensuales son siempre mayores a 10°C y menores a 20°C. Las oscilaciones térmicas son moderadas con veranos templados con medias de 22,8°C e inviernos suaves con mínimas de 5,6°C. El clima de la ciudad se caracteriza por una alta humedad relativa que promedia anualmente 82% y que concentra los niveles más altos de humedad ambiental entre los meses de abril y septiembre.

Para determinar la demanda energética se utilizó la base de datos climáticos de temperatura, humedad y velocidad del viento de la herramienta Optivent 2.0, cuya fuente es Energy Plus Weather Data para Chile. Para los datos de la radiación solar se recurrió a la herramienta Explorador Solar de la Universidad de Chile, la que permite obtener los valores exactos de radiación indecentes para una superficie, dada su ubicación geográfica, acimut y Angulo de inclinación. Las tablas con toda la información base para el cálculo se encuentran en el Anexo 1.

Las condiciones interiores de diseño de acuerdo con la tabla 1 del Reglamento de instalaciones Térmicas en los edificios en Chile, se escogió para invierno una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 50%.

Tabla 4: Temperaturas interiores de diseño para instalaciones térmicas en edificios de Chile. Fuente RITCH.

Estación	Temperatura operativa [°C]	Humedad relativa del aire [%]
Verano	23 a 25	40 a 60
Invierno	20 a 22	40 a 60

3.2.2 Características del edificio.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción o edificio San Agustín (UCSC) se sitúa en Alonso de Ribera 2850, Concepción, Región del Biobío. Este edificio se puede considerar como 2 edificios aledaños: el edificio salas y el edificio de oficinas de profesores. El edificio de salas tiene 3 plantas y su uso es principalmente como aulas de clases. El edificio de profesores tiene 4 plantas y su uso es de oficinas y administración. El horario de funcionamiento de lunes a viernes es de 07:30 a 22:00 y los sábados de 07:30 a 14:30, sin embargo, el horario en que comienzan las clases es a partir de las 08:00 y a partir de las 19:00 pm la mayoría de funcionarios académicos y de secretaria terminan su jornada, quedando en el edificio solo aquellos que deban ejercer otras labores.

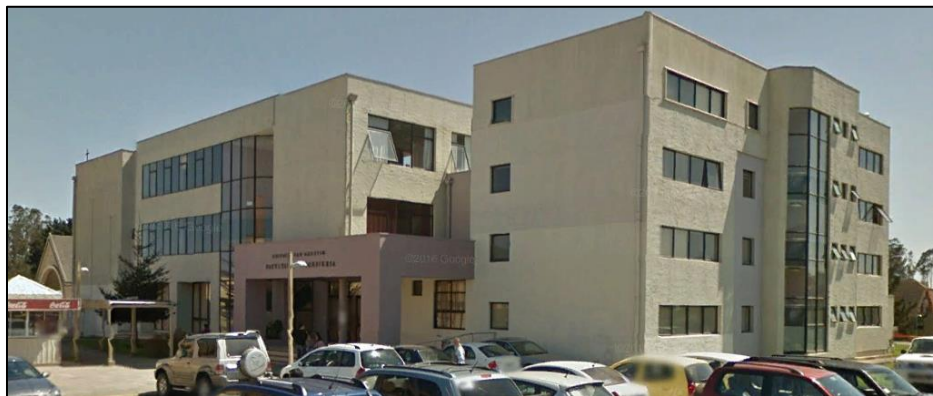


Figura 7: Edificio San Agustín visto desde el sureste. Rescatado de Google Earth.

La siguiente tabla resume las superficies y volúmenes de cada edificio, para este modelo se consideraron ambos edificios contiguos por lo que la cara este del edificio salas corresponderá a la cara oeste del edificio de profesores y su superficie no se considerará en el cálculo de cargas térmicas.

Tabla 5: Área de superficies y volumen del edificio de salas. Fuente Muñoz (2017)

Elemento constructivo	Orientación				Superficie total [m ²]
	Norte [m ²]	Este [m ²]	Oeste [m ²]	sur [m ²]	
Muro de hormigón	268,4	0	221,57	249,84	739,81
Ventana	155,49	0	110,35	147,91	485,91
Techo simple					189,656
Techo aislado					900,211
Volumen total del edificio de salas [m³]					9808,64

Tabla 6: Área de superficie y volumen del edificio de profesores. Fuente Muñoz (2017).

Elemento constructivo	Orientación				Superficie total [m ²]
	Norte [m ²]	Este [m ²]	Oeste [m ²]	sur [m ²]	
Muro	102,55	237,95	0	76,24	416,74
Ventana	28,02	82,87	0	4,68	115,57
Techo simple					0
Techo aislado					266,367
Volumen total del edificio de profesores [m³]					2541,21

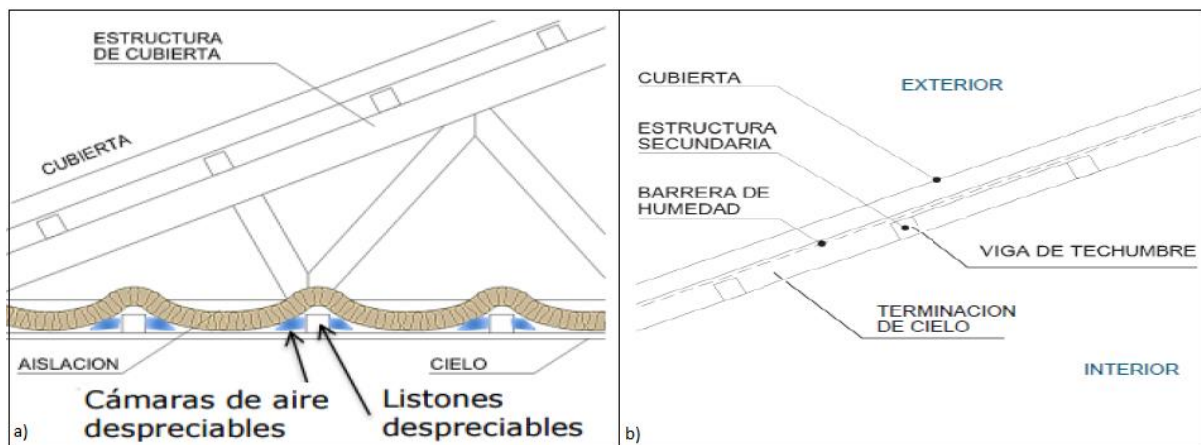


Figura 8: a) Estructura de la cercha del techo tipo 1. b) Estructura del techo tipo 2. Modificado de Muñoz (2017).

3.2.3 Demanda energética

La demanda energética de un edificio es la energía que este requiere para que en su interior un usuario pueda disfrutar de unas terminadas condiciones de confort. Esta energía incluirá entre otras, la energía necesaria para la calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de agua caliente sanitaria y la iluminación.

El calor representa la cantidad de energía que un cuerpo transfiere a otro como consecuencia de una diferencia de temperatura entre ambos. Este tipo de energía se denomina energía térmica. Al hablar de calor se debe hacer una distinción entre calor sensible y calor latente. Se define sensible el calor que un fluido recibe o pierde cuando cambia su temperatura. Se define calor latente el calor que un fluido recibe o pierde cuando cambia su estado interno, sin variar su temperatura. Son calores latentes los asociados a las transiciones de fase y el calor responsable de los cambios de humedad en el aire (Cengel & Boles, 2011).

Para obtener la demanda térmica se debe hacer un balance térmico en la edificación, como base para estos cálculos se considerará la metodología y el modelo de la facultad de ingeniería realizado por Muñoz (2017), trabajo en el que se calculó y modelo el comportamiento térmico del edificio. Sin embargo, algunas consideraciones para el modelo son distintas.

El balance térmico se realiza conociendo las cargas térmicas del edificio. Cuando hablamos de carga térmica sobre un edificio se entiende como la cantidad de energía que se requiere para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica, en nuestro caso el confort humano. Ósea la cantidad de calor que se retira o ingresa a un espacio definido, esta se mide en [kW]. Las cargas térmicas se pueden clasificar según su incidencia. Las cargas térmicas sensibles son aquellas que van a originar una variación en la temperatura del aire. Las cargas térmicas latentes son las que van a originar una variación en la humedad absoluta del ambiente.

Conocer las cargas térmicas es imprescindible, como paso previo a diseñar un sistema de climatización en una dependencia.

La carga térmica total de calefacción se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{calefaccion} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad (6)$$

Para el cálculo de la carga térmica sensible utilizamos la siguiente expresión:

$$Q_{sensible} = Q_s + Q_{str} + Q_{st} + Q_{si} + Q_{sai} \quad (7)$$

Donde:

Q_s es el valor de la carga sensible debida a la radiación solar.

Q_{str} es la carga sensible por transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores.

Q_{st} es la carga sensible por transmisión radiación a través de paredes y techos interiores.

Q_{si} es la carga sensible transmitida por infiltraciones de aire exterior.

Q_{sai} es la carga sensible debida a aportaciones internas.

Para el cálculo de la carga térmica latente utilizamos la siguiente expresión:

$$Q_{latente} = Q_{li} + Q_{lp} \quad (8)$$

Donde:

Q_{li} es la carga latente transmitida por infiltraciones de aire exterior.

Q_{lp} es la carga latente debida a la ocupación del local.

Por lo tanto, el cálculo de la carga térmica total se basa en calcular cada una de las diferentes cargas anteriores y sumarlas obteniéndose así el valor de la carga total. Para obtener valores confiables de cuanto energía realmente necesita el edificio y en que horas ocurren las mayores pérdidas energéticas este balance se realizó considerando un día promedio para cada mes, el cual consiste en las condiciones climáticas promedio para cada bloque horario del mes, dentro del rango horario de funcionamiento del edificio (8:00 a 22:00 horas). Debido a lo extenso de estos cálculos, se desarrollan en detalle en el Anexo 1.

Las tablas 8 y 9 resumen el balance de cargas térmicas para cada edificio, los valores positivos indican que el edificio gana energía, mientras que los valores negativos indican pérdidas energéticas ó la energía térmica que sería necesaria para que el edificio alcanza unas condiciones de confort con temperaturas interiores de 20°C.

Tabla 7: Cargas térmicas promedio horarias para el edificio de salas. Se observa que las principales perdidas energéticas del edificio ocurren en las mañanas y en las tardes entre los meses de junio y julio con valores peak sobre los 130 [kW] térmicos, requiriéndose calefacción 13 de las 15 horas de funcionamiento. Elaboración propia.

Cargas térmicas para el edificio de salas con una temperatura interior de 20°C [kWt]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8	-5,06	-49,93	-70,94	-90,74	-111,25	-134,77	-144,04	-122,50	-110,82	-80,49	-44,23	-12,46
9	50,91	14,27	-5,78	-41,02	-74,30	-98,11	-111,51	-87,53	-61,67	-25,77	6,72	25,11
10	107,51	73,57	54,04	5,14	-43,80	-66,86	-78,94	-56,23	-17,31	18,42	57,60	75,26
11	139,97	118,42	105,27	47,17	-4,19	-37,25	-48,30	-19,08	19,50	49,75	85,93	107,66
12	166,20	153,42	148,41	80,92	25,47	-14,01	-28,54	12,75	45,91	75,58	108,11	134,67
13	179,41	177,52	171,88	105,17	36,79	3,43	-11,31	27,26	62,56	95,61	128,35	155,79
14	194,60	204,62	195,54	122,85	47,41	17,32	2,61	37,55	76,11	107,85	143,49	171,24
15	192,35	209,56	195,42	116,69	34,22	22,51	7,56	38,95	73,56	106,30	140,02	170,29
16	187,56	200,90	182,22	97,41	4,01	4,81	-9,27	21,44	54,32	88,60	123,66	158,84
17	172,21	167,82	136,40	48,72	-40,77	-76,70	-56,88	-18,73	10,28	49,02	98,97	147,57
18	147,20	133,05	75,28	-24,35	-70,19	-89,51	-92,43	-76,34	-47,89	13,71	69,76	121,43
19	57,03	27,54	-22,30	-60,20	-88,81	-104,66	-106,26	-94,21	-82,45	-62,98	-28,89	37,50
20	-11,23	-13,96	-40,83	-74,01	-98,30	-115,74	-117,18	-105,28	-93,91	-76,77	-55,72	-25,25
21	-29,05	-30,40	-50,56	-82,72	-103,71	-120,03	-122,22	-111,42	-101,34	-86,69	-66,87	-40,01
22	-46,87	-46,83	-60,28	-91,42	-109,12	-124,33	-127,26	-117,57	-108,76	-96,61	-78,03	-54,77

Tabla 8: Cargas térmicas promedio horarias para el edificio de profesores. Se observa que en los meses de junio, julio y agosto se requiere calefacción durante las 15 horas de funcionamiento, alcanzando valores peak sobre los 25 [kW] térmicos durante las tardes. Elaboración propia.

Cargas térmicas para el edificio de profesores con una temperatura interior de 20°C [kWt]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8	11,00	3,53	-2,68	-10,15	-16,73	-22,24	-23,83	-18,24	-13,76	-5,87	3,82	9,02
9	20,17	13,83	8,22	-1,91	-10,45	-15,43	-18,06	-12,69	-6,02	2,27	10,42	14,02
10	27,42	21,32	15,79	3,87	-6,96	-11,67	-13,82	-9,00	-0,97	7,01	15,89	18,07
11	29,23	25,12	20,77	7,78	-2,46	-8,91	-10,85	-5,14	1,80	8,46	16,40	18,63
12	29,49	26,57	23,78	10,07	-0,04	-7,50	-9,78	-2,47	2,58	8,69	15,50	21,40
13	28,39	26,57	23,99	11,23	0,54	-6,17	-8,53	-2,13	2,80	9,53	16,09	22,73
14	29,08	28,67	25,76	12,73	1,65	-4,46	-6,88	-1,27	3,47	10,10	16,77	23,22
15	27,41	28,00	24,28	10,98	-0,26	-4,64	-6,73	-1,92	2,08	8,84	14,94	21,53
16	25,82	26,58	21,96	8,51	-3,08	-6,18	-7,99	-3,79	-0,33	6,60	12,48	19,27
17	22,40	22,15	16,29	3,31	-7,65	-12,24	-12,30	-8,03	-4,66	2,21	8,93	16,02
18	18,88	18,33	10,59	-1,76	-10,60	-14,53	-15,25	-12,07	-8,64	-1,30	5,50	12,50
19	3,37	2,19	-4,02	-11,97	-18,13	-21,64	-22,10	-19,54	-17,18	-12,74	-7,88	-0,90
20	-1,74	-2,29	-7,86	-14,85	-20,10	-23,97	-24,36	-21,82	-19,56	-15,62	-11,31	-4,65
21	-5,44	-5,71	-9,86	-16,68	-21,25	-24,88	-25,47	-23,12	-21,12	-17,70	-13,59	-7,70
22	-9,14	-9,14	-11,87	-18,50	-22,40	-25,78	-26,57	-24,41	-22,68	-19,79	-15,88	-10,76

Para efectos del cálculo del sistema de climatización geotérmico se tendrá la siguiente consideración: La mayor fuente de infiltraciones en el edificio salas corresponde al caudal del aire que entra por las puertas principales de este edificio, esta infiltración afecta principalmente el área del hall de este edificio y por lo tanto, esta área no está considerado climatizarla. Mientras que para el edificio de profesores la infiltración es a través de las puertas de ingreso solo afecta los pasillos. Debido a que solo climatizaremos las aulas y oficinas que generalmente se encuentran con las puertas cerradas, considerar que estas se ven afectadas por la carga de ventilación e infiltración llevaría sobredimensionar el sistema. Por eso para el dimensionado del sistema de captación geotérmico y de distribución del calor, despreciaremos la carga latente y sensible de infiltración debidas al caudal de aire que ingresa por las puertas principales de ambos edificios.

De esta manera las cargas térmicas que se utilizaran para el dimensionamiento del sistema de climatización del edificio de salas son las siguientes:

Tabla 9: Cargas térmicas corregidas para el edificio de salas. Los valores negativos (en negrita) representan perdidas energéticas ó la cantidad de energía térmica necesaria para alcanzar un equilibrio térmico en 20°C. Elaboración propia.

Cargas térmicas para el edificio de salas con una temperatura interior de 20°C [kWt]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8	22,74	-15,57	-30,79	-46,88	-65,37	-84,97	-91,82	-73,20	-60,95	-36,69	-8,88	15,84

9	68,87	38,81	25,14	-2,50	-31,14	-50,78	-61,43	-41,01	-17,33	10,93	34,38	45,96
10	115,63	88,29	75,74	38,32	-3,35	-22,02	-31,00	-12,48	21,50	48,02	77,57	88,64
11	142,96	126,97	118,60	73,67	30,62	3,97	-4,28	19,05	52,96	75,07	102,40	116,59
12	164,07	155,79	153,37	100,73	54,64	23,59	11,57	45,28	74,03	96,64	121,10	139,16
13	174,97	176,45	173,64	121,87	63,27	37,88	25,72	57,61	88,72	114,51	139,05	158,09
14	187,85	200,10	194,12	136,44	71,19	48,62	36,57	65,73	100,30	124,60	151,90	171,35
15	185,25	203,86	193,88	130,37	57,93	52,86	40,14	66,62	97,74	122,75	148,49	170,27
16	180,10	194,02	180,55	111,19	27,65	34,20	21,93	48,61	78,48	104,74	132,20	158,69
17	167,14	162,93	138,11	65,22	-13,89	-44,60	-23,59	10,52	36,01	67,15	109,67	149,85
18	144,52	130,15	80,36	-5,13	-40,08	-54,69	-57,06	-45,01	-20,60	33,84	82,61	126,14
19	59,47	30,32	-11,06	-36,40	-55,55	-66,18	-67,27	-59,20	-51,36	-38,29	-11,33	45,96
20	-3,67	-5,49	-23,45	-45,63	-61,89	-73,58	-74,56	-66,60	-59,02	-47,50	-33,45	-13,04
21	-15,58	-16,47	-29,94	-51,45	-65,51	-76,46	-77,94	-70,71	-63,98	-54,14	-40,90	-22,90
22	-27,48	-27,46	-36,44	-57,27	-69,13	-79,33	-81,32	-74,81	-68,95	-60,77	-48,35	-32,76

Tabla 10: Cargas térmicas corregidas para el edificio de profesores. Los valores negativos (en negrita) representan pérdidas energéticas o la cantidad de energía térmica necesaria para alcanzar un equilibrio térmico en 20°C. Elaboración propia.

Cargas térmicas para el edificio de profesores con una temperatura interior de 20°C [kWt]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8	11,70	4,38	-1,67	-9,05	-15,59	-21,00	-22,53	-17,01	-12,52	-4,77	4,70	9,72
9	20,62	14,44	8,99	-0,95	-9,37	-14,25	-16,81	-11,53	-4,91	3,19	11,11	14,54
10	27,62	21,69	16,33	4,70	-5,95	-10,55	-12,63	-7,91	0,00	7,75	16,39	18,40
11	29,31	25,33	21,11	8,44	-1,59	-7,88	-9,75	-4,19	2,64	9,10	16,81	18,86
12	29,43	26,63	23,90	10,56	0,69	-6,56	-8,77	-1,65	3,28	9,21	15,83	21,51
13	28,28	26,55	24,03	11,65	1,20	-5,31	-7,60	-1,37	3,45	10,00	16,35	22,79
14	28,92	28,56	25,72	13,07	2,24	-3,68	-6,03	-0,56	4,08	10,52	16,98	23,22
15	27,24	27,86	24,24	11,32	0,33	-3,88	-5,91	-1,23	2,69	9,25	15,15	21,53
16	25,63	26,41	21,92	8,85	-2,49	-5,45	-7,21	-3,11	0,27	7,00	12,70	19,26
17	22,28	22,03	16,34	3,72	-6,98	-11,44	-11,47	-7,29	-4,01	2,67	9,20	16,08
18	18,81	18,26	10,72	-1,28	-9,85	-13,66	-14,36	-11,29	-7,96	-0,80	5,82	12,62
19	3,43	2,26	-3,74	-11,37	-17,30	-20,68	-21,13	-18,67	-16,40	-12,12	-7,44	-0,68
20	-1,55	-2,08	-7,43	-14,14	-19,19	-22,92	-23,30	-20,86	-18,69	-14,89	-10,75	-4,34
21	-5,10	-5,37	-9,35	-15,90	-20,30	-23,79	-24,36	-22,10	-20,19	-16,89	-12,95	-7,28

22	-8,66	-8,65	-11,27	-17,65	-21,40	-24,66	-25,43	-23,34	-21,69	-18,89	-15,14	-10,21
----	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Es importante destacar que para el edificio de salas no considerar la infiltración redujo la carga máxima de calefacción a las 8:00 en julio de -144 [kWt] a -91,82 [kWt], ósea la pérdida de 51,82 [kW] térmicos se deben exclusivamente a las infiltraciones por las puertas principales. Mientras que el edificio de profesores se ve menos afectado por las cargas de infiltración.

Para dimensionar correctamente un sistema de calefacción debemos considerar el mes más desfavorable, en ambos edificios corresponde al mes de julio, y la cantidad de horas anuales en las que tenemos un balance de carga térmica negativo, ósea las horas en las que se requiere una potencia térmica de calefacción.

Los gráficos 1 y 2 indican la cantidad de horas anuales laborales en las que ambos edificios requieren calefacción según el intervalo de potencia térmica. Estas horas corresponden a las comprendidas entre los meses de marzo a diciembre en un horario de 8:00 a 21:00 horas de lunes a viernes (Tabla 11), el rango horario de 21 a 22 horas no se considera para el cálculo de calefacción debido a que son muy puntuales las clases en ese horario. Para el edificio de salas tenemos 1266 horas anuales con potencia peak de 91,8 [kWt], mientras que para el edificio de profesores tenemos 1773 horas anuales con una potencia peak de 24,36 [kWt].

Tabla 11: Días laborales por mes considerados para los cálculos, se tomó como base el año 2017.

Mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Días laborales	22	20	23	20	23	22	21	23	21	22	22	21

Grafico 1: Cantidad de horas anuales según intervalo de potencia para el edificio de salas. Elaboración propia.

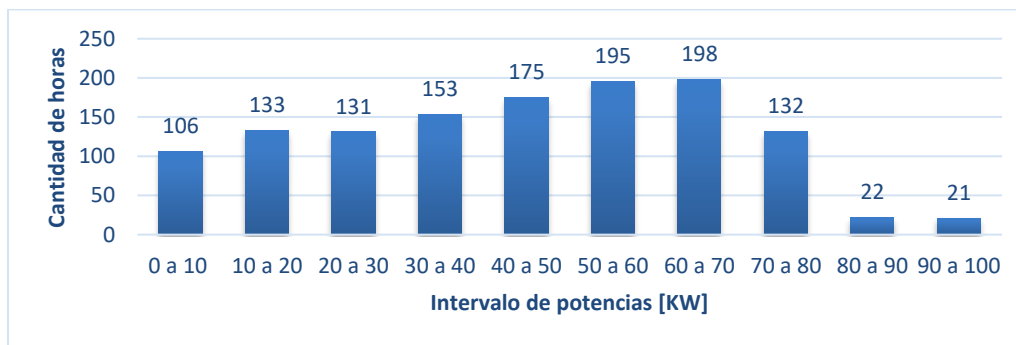
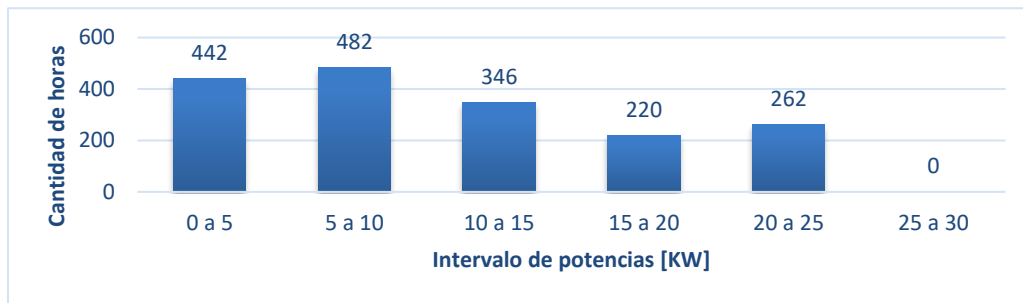


Grafico 2: Cantidad de horas anuales según intervalo de potencia para el edificio de profesores. Elaboración propia.



Para escoger la potencia térmica peak del sistema de calefacción de ambos edificios, se consideró una que cubriera por lo menos el 70% de las horas anuales laborales que requieren calefacción. Los gráficos 3 y 4 muestran que porcentaje de las horas anuales, en que se requieren calefacción, son cubiertas según la potencia térmica que escogemos para nuestro sistema de calefacción. Se determinó con que una potencia de 60 [kWt] se cubre un 70,5% de la demanda del edificio de salas (893 de 1266 horas), mientras que con una potencia de 15 [kWt] se cubre un 71,6% de la demanda del edificio de profesores (1270 de 1773 horas).

Para las horas en las que se requiera una potencia mayor a la escogida se determinó que con la potencia peak escogida, la temperatura interior alcanzará valores de 17°C en vez de los 20°C, la que está dentro de un rango aceptable considerando que cubrir un 100% de la demanda llevaría a un aumento importante de los costos de inversión del sistema geotérmico.

Grafico 3: Porcentaje de horas de calefacción cubiertas según la potencia de calefacción escogida para el edificio de salas. Elaboración propia.

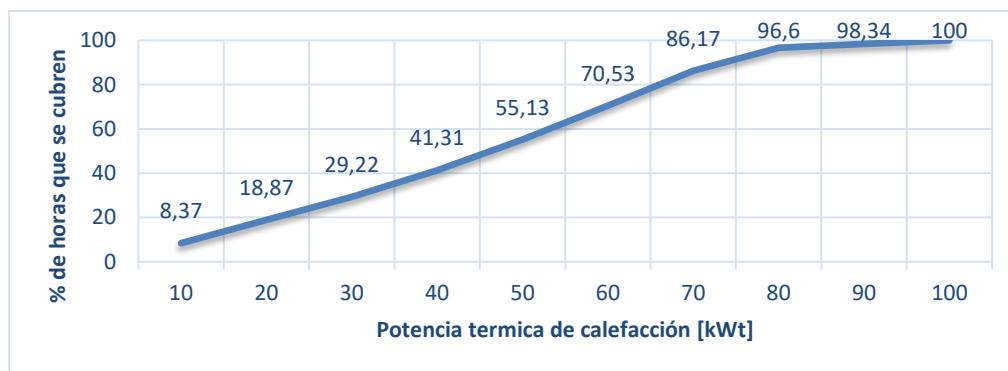
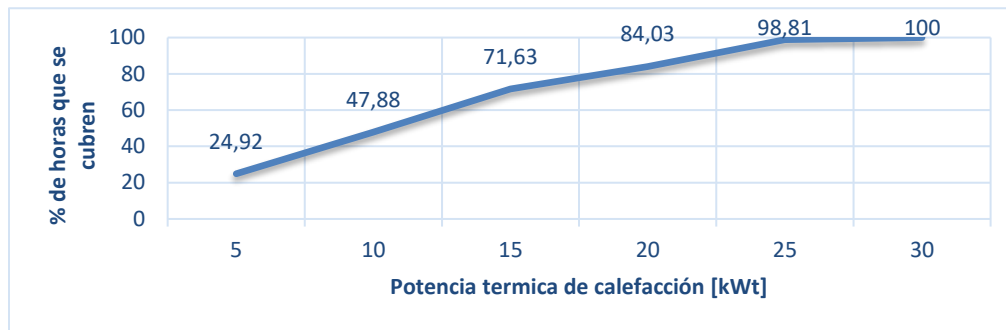


Grafico 4: Porcentaje de horas de calefacción cubiertas según la potencia de calefacción escogida para el edificio de profesores. Elaboración propia.



De esta manera nuestras potencias peak de diseño del sistema geotérmica serán de 66 [kWt] para el edificio de salas y de 18 [kWt] para el edificio de salas.

3.2.4 Distribución mensual de la demanda energética

Para estimar la demanda mensual de calefacción se consideraron las horas laborales mensuales en las que requiere energía (Valores negativos de carga térmica).

Para el cálculo de la energía requerida se multiplico a la carga térmica horaria de cada mes por los días laborales de este (Tabla 11). Para los horarios en que se requiera más potencia que la carga peak de diseño (66 [kWt] para el edificio salas y 18 [kWt] para el edificio de profesores) se considera la carga peak. La energía demandada anualmente corresponde a la suma de las demandas energéticas horarias mensuales.

Las tablas 12 y 13 resumen el cálculo de la demanda energética mensual y energía térmica demanda anualmente para ambos edificios.

Tabla 12: Distribución mensual de la demanda energética para calefacción del edificio de salas. Elaboración propia.

Energía necesaria para satisfacer la carga térmica de calefacción del edificio de salas [kWh]										
Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía mensual	2190,5	3759,8	7452,1	9066,1	8734,6	7767,2	5634,4	3885,6	2080,2	754,7
Energía anual	51325,3									

Tabla 13: Distribución mensual de la demanda energética para calefacción del edificio de profesores. Elaboración propia.

Energía necesaria para satisfacer la carga térmica de calefacción del edificio de profesores[kWh]										
Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía mensual	510,2	1035,8	2213,4	3138,7	3333,7	2533,1	1562,5	1046,9	685,1	258,4
Energía anual	16317,7									

De esta manera la energía total anual para mantener una temperatura de confort de por lo menos 20°C para el edificio de salas es de 51325 [kWh] y para el edificio de profesores es de 16515[kWh].

Tabla 14: Distribución mensual de la demanda energética total para calefacción del edificio San Agustín. Elaboración propia.

Energía necesaria para satisfacer la carga térmica de calefacción total del edificio San Agustín[kWh]										
Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Total mes	2700,748	4795,631	9665,544	12204,836	12068,279	10300,271	7196,861	4932,476	2765,223	1013,077
Total anual	67642,945									

La demanda total del edificio san Agustín corresponde a la suma de las demandas anteriores, esta corresponde a 67642 [kWh].

4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA GEOTERMICO

4.1 Elección del tipo de captación geotérmica

4.1.1 Valoración de los colectores horizontales

Una de las limitaciones de este tipo de colectores es la inestabilidad de la temperatura del suelo a poca profundidad, recordemos que bajo los 15 m la temperatura se estabiliza (Ericsson, 1985). Debido a la alta demanda energética del Edificio San Agustín se requerirán grandes extensiones de terreno para instalar los campos colectores, además recordemos que el terreno sobre el que se instalan los campos debe quedar libre de construcciones como estacionamientos en nuestro caso además esto imposibilitaría nuevas obras cercanas a la facultad, por lo que se descarta este tipo de captación.

4.1.2 Valoración de un circuito abierto

En los alrededores del edificio San Agustín no se tienen registros de acuíferos o grandes cuerpos de agua para los que este tipo de sistemas serían útiles, por lo que se descarta.

4.1.3 Valoración de pilote geotérmico

Esta opción resulta rentable si se realiza al momento de la construcción del edificio. Lamentablemente para este proyecto el edificio ya se encuentra construido por lo que se descarta este tipo de captación.

4.1.4 Valoración de los colectores verticales

Debido a la magnitud de la potencia térmica requerida el sistema de colectores verticales es que entrega mayores cantidades de energía sin comprometer grandes extensiones de terreno, gracias a permite aprovechar la temperatura constante del suelo bajo los 15 m de profundidad. Del estudio sobre la geología local se estimó que se cuenta con suelo apto para extraer energía hasta los 200 m, recordemos que a mayores profundidades tenemos mayores temperaturas.

Además, el edificio San Agustín posee una franja de área verde alrededor donde es posible instalar las sondas geotérmicas. Recordemos son necesarias perforaciones de pequeño diámetro (100 a 160 mm).

Debido a estas consideraciones la captación mediante sondas geotérmicas es la opción más favorable, tanto por espacio disponible y mejores rendimientos energéticos.

4.2 Elección de la bomba de calor geotérmica

El dimensionamiento de la bomba de calor se realiza con base en el consumo del edificio en función de la temperatura exterior en el diagrama de potencia de caldeo y en las curvas de rendimiento de las bombas de calor. La potencia térmica o de caldero que nos entrega la BCG depende de la temperatura de entrada a la fuente del calor y de la temperatura de salida que requerimos en nuestro sistema de calefacción. Los mejores rendimientos se obtienen con mayores temperaturas de entrada y menores temperaturas de salida.

Actualmente los sistemas de distribución de calor más modernos como los suelos radiantes y, lo que conlleva importantes ahorros energéticos con COP entre 3 y 5 (Dimplex ,2009). Sin embargo, también existen bombas de calor de alta temperatura que logran temperaturas de hasta 70°C siendo compatibles con sistemas de radiadores tradicionales, pero sacrifican esta eficiencia energética, por ejemplo, llegando a valores de COP cercanos a 2.

Debido a que el objetivo de este proyecto es la estudiar la factibilidad de implementar un sistema de climatización eficiente y ecológico se consideraran 2 soluciones para calefaccionar el edificio y se compararan las rentabilidades de ambas. La primera corresponde a utilizar una bomba de calor de alta temperatura utilizando las instalaciones de radiadores ya existentes, la segunda solución consiste en utilizar una bomba de calor tradicional y reemplazar los radiadores tradicionales por radiadores modernos de baja temperatura.

Para evitar congelar el subsuelo el software EED permite diseñar sistemas de intercambiadores geotérmicos restringiendo la temperatura que se quiere alcanzar en el subsuelo tras 20 años de funcionamiento del sistema, por lo que el rango de funcionamiento de todas las bombas evaluadas será a partir de una temperatura de 2°C en el fluido de entrada proveniente del sistema de captación.

4.2.1 Bomba de calor de alta temperatura.

Se escogió una bomba de calor tierra-agua de la marca alemana DIMPLEX modelo SIH 90TU solo para calefacción. El modelo tiene la opción de funcionar con 1 o 2 compresores según sea la demanda. Sus temperaturas de funcionamiento en el sistema de captación van de -5° a los 25°C y emite agua a una temperatura de hasta 70°C .

Los valores de la potencia de caldeo según la normativa EN14551 están datos por el grafico 6. Apreciamos que la bomba entregara potencias de hasta 90 [kW] con una temperatura de entrada de 2°C y temperaturas de salida de 65°C .

En cuanto al rendimiento de la bomba (ver gráfico 5), apreciamos que con una temperatura de salida de 65°C y entrada de 2°C se obtienen valor COP 2.5, Mientras que con temperaturas de entrada de 5°C se tiene COP 2.7.

Grafico 5: Curva de COP según temperatura de entrada en la fuente de calor para el modelo SIH 90TU. Las curvas en negrita indican funcionamiento con dos compresores, mientras que las curvas simples indican el funcionamiento con un solo compresor. Rescatado de <http://www.dimplex.de>.

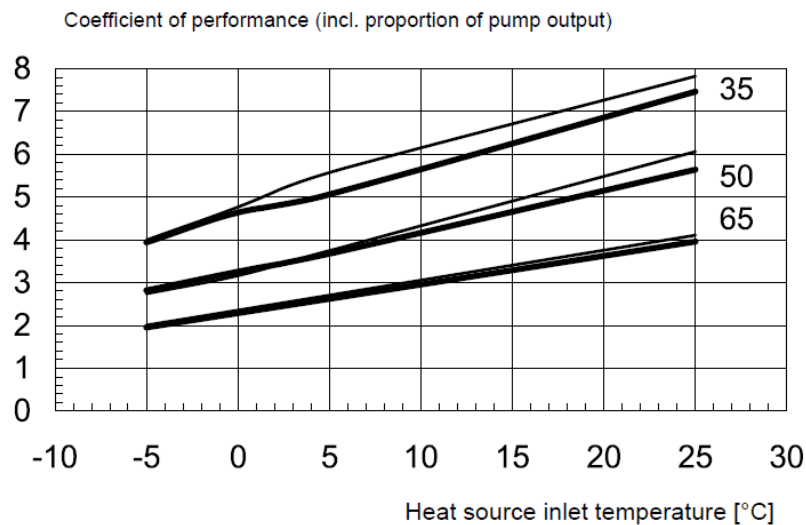
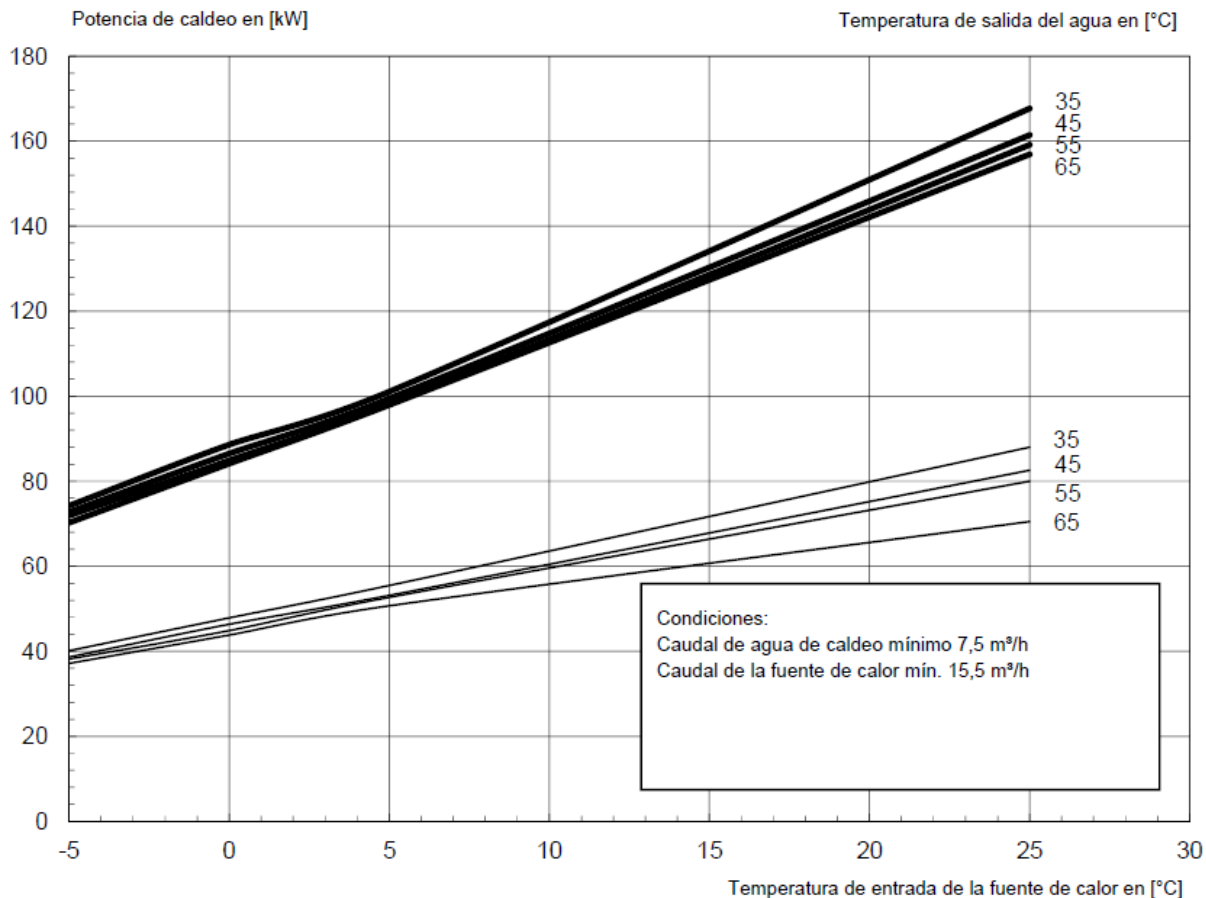


Gráfico 6: Curva de Potencias de caldeo según temperatura de entrada de la fuente de calor para el modelo SIH 90TU. Las curvas en negrita indican funcionamiento con dos compresores, las curvas simples indican funcionamiento con un solo compresor. Rescatado de <http://www.dimplex.de>.



4.2.2 Bomba de calor tradicional

Se escogió una bomba de calor tierra-agua de la marca alemana DIMPLEX modelo SI 90TU. Este modelo tiene la opción de funcionar con uno o dos compresores según la demanda energética y entrega una temperatura de salida del agua de hasta 58°C.

La curva característica de funcionamiento (ver gráfico 7) según fabricante nos indica que para temperaturas de entrada promedio de 2°C y temperatura de calefacción en 55°C nos entrega potencias de hasta 83 [kW].

En cuanto al rendimiento (ver gráfico 8), para una temperatura de entrada de 2°C y temperatura de salida de 55°C obtenemos valores COP 3.2, con temperaturas de entrada de 5°C este valor aumenta a COP 3.4.

Grafico 5: Curva de Potencias de caldeo según temperatura de entrada de la fuente de calor para el modelo SI 90TU. Las curvas en negrita indican funcionamiento con dos compresores, las curvas simples indican funcionamiento con un solo compresor. Rescatado de <http://www.dimplex.de>.

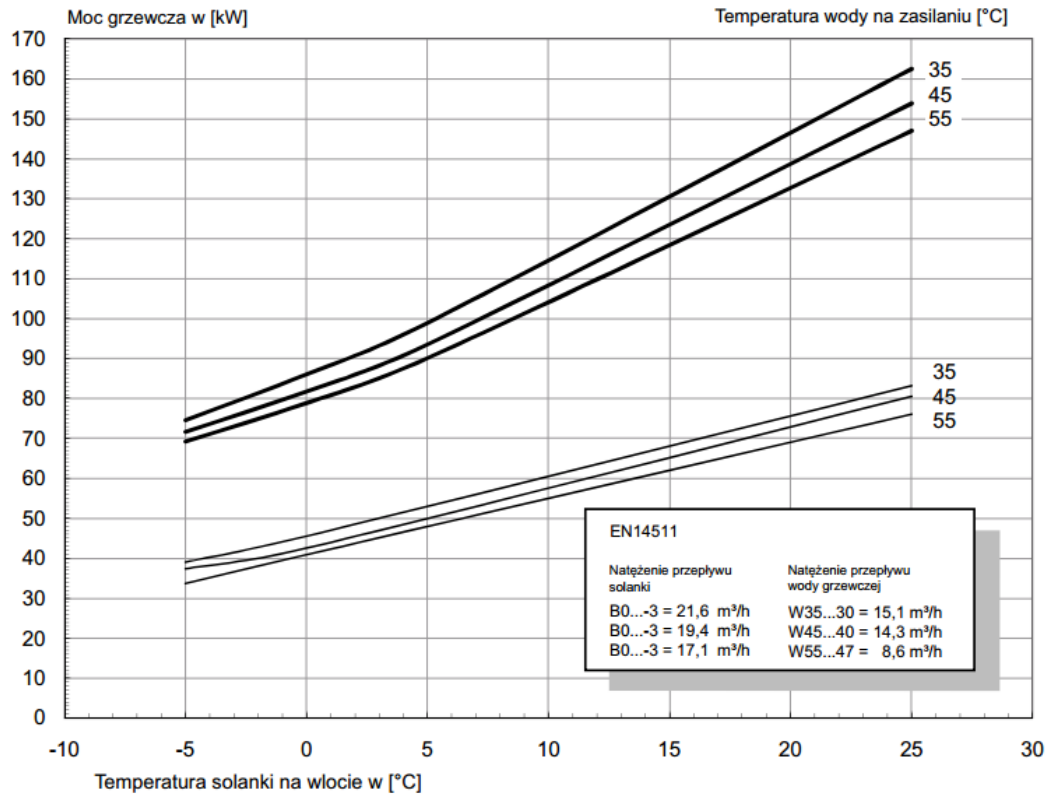
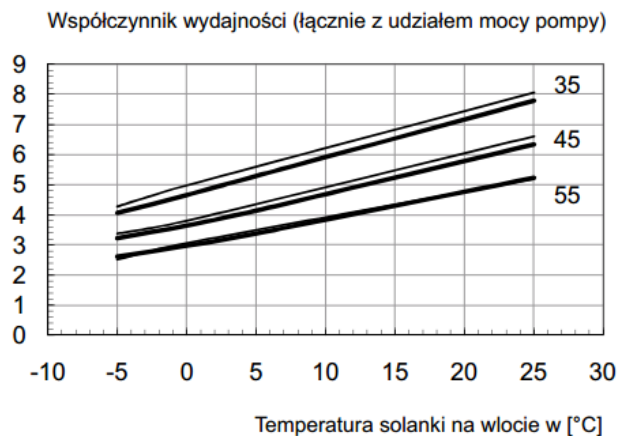


Grafico 6: Curva de COP según temperatura de entrada en la fuente de calor para el modelo SI 90TU. Las curvas en negrita indican funcionamiento con dos compresores, mientras que las curvas simples indican el funcionamiento con un solo compresor. Rescatado de <http://www.dimplex.de>.



4.3 Diseño del sistema de captación geotérmico

Para dimensionar el sistema de captación se utilizará el software Earth Energy Designer (EED), este permite configurar intercambiadores de calor subterráneos verticales. Es de fácil manejo y posee una amplia base de datos respaldada por estudios sobre la interacción térmica entre las sondas geotérmicas y el terreno llevados a cabo por sus desarrolladores (Hellstrom, 1998). EED dimensiona los intercambiadores a través soluciones analíticas del flujo de calor en varias combinaciones posibles para el patrón de las sondas geotérmicas y su geometría (funciones-g). Las funciones-g dependen del espaciamiento superficial entre las sondas y la profundidad que estas alcanzan. El programa cuenta con amplia base de datos para 798 configuraciones posibles, así como tipos de sondas y sus materiales. De esta manera permite obtener las configuraciones recomendadas para cada caso.

Para la elección de la configuración de intercambiadores adecuada estamos limitados por la disponibilidad de terreno libre de construcciones alrededor del edificio (ver figura 9). Además, es importante que los sondajes se realicen lo más cerca posible del cuarto donde se instalarán las bombas de calor (actual sala de calderas) para disminuir las pérdidas de energía durante la circulación.

Se determinaron 3 zonas donde sería posible realizar los sondajes.



Figura 9: Zonas favorables para la instalación de las sondas geotérmicas. Basado en Google Earth.

La zona 1 es la más próxima a la sala de calderas, pero es limitada en superficie, posee una superficie útil de 102 m^2 donde solo es posible una configuración lineal de sondas debido a que la distancia mínima recomendada entre sondas es de 6m. En este sector se pueden instalar hasta 6 sondas.

La zona 2 se encuentra a una distancia promedio de 14 m de la sala de calderas, posee una superficie útil de 120 m^2 donde es posible una configuración lineal de hasta 5 sondas.

La zona 3 es la más lejana a una distancia promedio de 30 m de la sala de calderas, posee una superficie útil de 270 m^2 donde es posible instalar hasta 10 sondas en configuración rectangular 5×2 .

4.3.1 Ingresando las propiedades del terreno

El software EED pide ingresar 4 valores para caracterizar térmicamente el terreno, la estimación de la conductividad térmica y capacidad calorífica volumétrica se realizó en el apartado 3.1, para la temperatura superficial del terreno se consideró la temperatura promedio del mes de julio 11,8 °C según la base de datos de Optivent 2.0. El flujo de calor geotérmico se consideró un valor promedio mundial según la base de datos del software.

Propiedades del terreno			
Conductividad térmica	<input type="text" value="2,050"/>	<input style="border: 1px dashed blue;" type="text" value="?"/>	W/(m·K)
Capacidad calorífica volumétrica	<input type="text" value="2,160"/>	<input style="border: 1px dashed blue;" type="text" value="?"/>	MJ/(m³·K)
Temperatura superficial del terreno	<input type="text" value="11,800"/>	<input style="border: 1px dashed blue;" type="text" value="?"/>	°C
Flujo de calor geotérmico	<input type="text" value="0,07000"/>	<input style="border: 1px dashed blue;" type="text" value="?"/>	W/m²

Figura 10: Propiedades térmicas del terreno consideradas en la simulación. Rescatado de EED 4.17.

4.3.2 Datos del sondeo e intercambiador geotérmico

Para estimar los sondajes disponibles se consultó a la empresa LIEM por los diámetros disponibles para sondajes, se ofrecieron 2 diámetros: 96,7mm y 143,5mm. El diámetro de 96,7 mm es adecuado para sondas U simple o doble DN 32, mientras que el diámetro 143,5 es adecuado para sondas U doble DN 40.

Se escogieron sondas geotérmicas U-Doble PE DN32 SDR-17 con un espesor de pared de 2 mm en un pozo de 96,7 mm de diámetro, debido a que los valores de sondajes para diámetros mayores a elevaban considerablemente los costos y la ganancia de calor extraído no justificaba el costo. Además, utilizar diámetros pequeños en los sondajes reduce la resistencia térmica de estos.

Tabla 15: Características de la sonda escogida. Elaboración propia.

Características de la sonda	
Presión [bar]	4
Diámetro interior [mm]	28
Diámetro exterior [mm]	32
Conductividad [W/m K]	0,420

Conociendo las propiedades de la sonda ahora podemos calcular el caudal necesario para asegurar la turbulencia del fluido, para ello utilizaremos la ecuación de Reynolds.

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \varphi \cdot D} > 2300 \quad (9)$$

Donde Re es el número de Reynolds, que si es mayor a 2300 tenemos una turbulencia en el fluido, D corresponde al diámetro interior del tubo, φ es la viscosidad cinemática del agua a 5°C $1,519 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$ y Q el caudal (m^3/s).

Despejando el caudal de la ecuación (9) tenemos:

$$Q > \frac{2300 \cdot \pi \cdot \varphi \cdot D}{4} = \frac{2300 \cdot \pi \cdot 1,519 \cdot 10^{-6} \cdot 0,032}{4} = 0,088 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,088 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Así nuestro caudal de diseño debe ser superior a $0,088 \text{ [l/s]}$, algunos autores (Uponor, 2013) recomiendan velocidades máximas de flujo de 1 [m/s] lo que en nuestra sonda sería un caudal de $0,616 \text{ [l/s]}$. Finalmente, se decidió considerar un caudal de $0,616 \text{ [l/s]}$ debido a que entregaba mejores resultados en la captación de calor, lo que reducía considerablemente los metros lineales necesarios de sondajes en las simulaciones.

Debido al terreno disponible se consideraron arreglos lineales para los sondajes distribuidos en las 3 zonas próximas a la facultad (ver figura 9), con una separación mínima de 7m para evitar interferencias térmicas entre los sondajes. El software estima según los datos ingresados un conjunto de soluciones en la distribución de los sondajes, que cumplen las demandas energéticas, de las cuales se escoge la más conveniente para el espacio disponible.

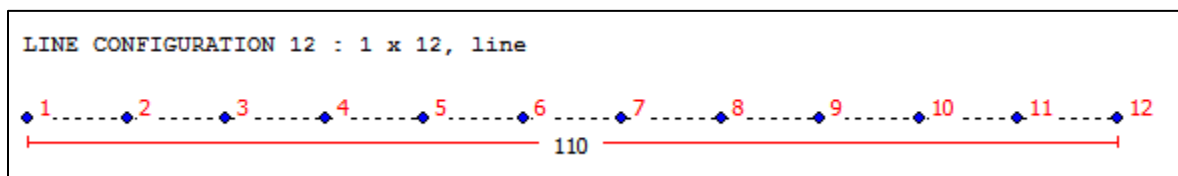


Figura 11: Ejemplo de arreglo lineal para los sondajes dado por el software, corresponde a un arreglo de 12 sondas con separaciones de 10m entre sondas. Recuperado de EED 4.17.

Para el relleno del sondaje se utilizará GeoSolid 235 de la marca Fischer, este relleno posee una alta conductividad térmica de $2,35 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$. La ventaja de utilizarlo radica en que si el relleno de los sondajes tiene una alta conductividad térmica se reduce la pérdida de calor durante la transferencia de calor, ósea se reduce la resistencia de la sonda (Uponor ,2013). Recordemos que cuanto menor es la resistencia térmica de la sonda mayor es la transferencia de frío o calor con el terreno. El software realiza el cálculo de esta resistencia por su cuenta.

Sondeo		Tubería en U	
Tipo	U-Boble	Diámetro exterior	32,000 mm
Configuración	12 ?	Espesor de la pared	2,000 ? mm
12 ("13 : 1 x 13, line")		Conductividad térmica	0,420 W/(m·K)
Profundidad	99,04 m	Distancia entre ejes de las tuberías	58,000 mm
Distancia entre sondeos	10,00 m		
Diámetro	96,700 ? mm		
Resistencia de contacto Tubería / Relleno	0,0000 (m·K)/W		
Conductividad térmica del relleno	2,350 ? W/(m·K)		
Caudal volumétrico Q:			
<input type="radio"/> Para todos los sondos	<input checked="" type="radio"/> Por cada sondeo		
	0,616 l/s		
Factor serie (1=paralelo)	1	Qbh=Q=0,616 l/s	

Figura 12: Valores considerados para el diseño geotérmico en las simulaciones. Rescatado de EED 4.17.

4.3.3 Fluido caloportador

Como se trabajará con temperaturas de captación sobre los 2°C para evitar congelación, se utilizará agua a 5°C como fluido caloportador. La base de datos de EED contiene todos valores requeridos para utilizar agua.

Conductividad Térmica	0,5720	W/(m·K)
Capacidad calorífica másica	4202,0000	J/(Kg·K)
Densidad	1000,0000 ?	Kg/m³
Viscosidad	0,001520	Kg/(m·s)
Punto de congelación	0,00	°C

Figura 13: Propiedades del agua a 5°C consideradas en la simulación. Rescatado de EED 4.17.

4.3.4 Demanda base y demanda peak

Para ingresar las demandas base se consideraron los valores obtenidos en la tabla 14 del apartado 2.3.2, el valor COP se consideró el correspondiente a una temperatura del fluido de entrada de 5°C según la bomba escogida para cada simulación.

Tabla 16: Coeficientes de rendimiento considerados en las simulaciones. Basado en catálogos de fabricante Dimplex.

Bomba	Temp de entrada [°C]	COP
Alta temperatura	5	2,7
Tradicional	5	3,4

Los valores peak de calor corresponden a los valores máximos de carga térmica para cada mes. Se obtuvieron sumando las cargas térmicas de ambos edificios, los valores positivos se ignoraron puesto que no corresponden a pérdidas. La tabla 15 contiene los valores finales considerados.

El software EED nos pide ingresar la duración máxima continua que alcanza una carga peak, en nuestro caso la mayor duración de carga peak ocurre en los meses de junio a agosto con 3 horas seguidas a 75 [KW].

Tabla 17: Cargas térmicas para el edificio san Agustín consideradas para calcular el sistema de calefacción. Elaboración propia.

Cargas térmicas para el edificio san Agustín con una temperatura interior de 20°C [KW]										
Hora	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8	-32,466	-55,929	-75,000	-75,000	-75,000	-75,000	-72,516	-41,461	-8,882	0,000
9	0,000	-3,448	-40,503	-65,035	-75,000	-52,539	-22,242	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	-9,301	-32,570	-43,632	-20,392	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	-1,593	-7,879	-14,030	-4,189	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	-6,564	-8,774	-1,653	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	-5,314	-7,603	-1,369	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	-3,677	-6,029	-0,564	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	-3,885	-5,913	-1,225	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	-2,490	-5,450	-7,210	-3,111	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	-20,876	-56,037	-35,061	-7,295	-4,013	0,000	0,000	0,000
18	0,000	-6,402	-49,923	-68,356	-71,427	-56,297	-28,559	-0,800	0,000	0,000
19	-14,796	-47,776	-70,555	-75,000	-75,000	-74,204	-66,360	-50,411	-18,771	-0,685
20	-30,871	-59,774	-75,000	-75,000	-75,000	-75,000	-74,018	-62,393	-44,197	-17,381
21	-39,290	-66,452	-75,000	-75,000	-75,000	-75,000	-75,000	-69,137	-53,842	-30,175

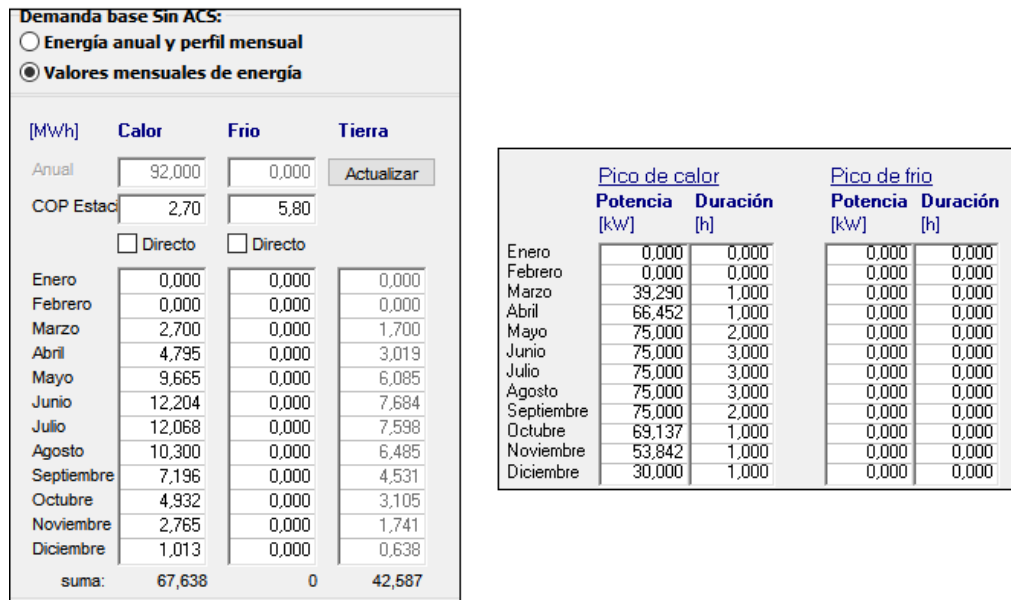


Figura 14: Cargas base y peak ingresadas al software. Rescatado de EED 4.17.

4.4 Resultados de las simulaciones

El software EED estima el comportamiento que tendrá el campo de captación geotérmico en un periodo de simulación ingresado por el usuario. Se realizó simulaciones a 20 años para considerar en el diseño el comportamiento del sistema en el año 20.

4.4.1 Sistema de colectores utilizando la bomba de alta temperatura

Con las consideraciones explicadas en el apartado 4.3 y considerando un COP 2,7 para la bomba de calor, EED nos entrega una serie de resultados que satisfacen la demanda energética. Se escogió el que tuviera un menos costo y corresponde a un arreglo lineal de 10 pozos, con una profundidad de 91 metros y espaciados 10 metros. La longitud total del arreglo es de 913 metros.

La siguiente tabla resume los mejores resultados útiles obtenidos.

Tabla 18: Selección de los mejores resultados obtenidos por la simulación. Elaboración propia.

Arreglo	Espaciado [m]	Profundidad [m]	Longitud total [m]
1 x 10 line	10	91	913
1 x 10 line	9	92	923
1 x 10 line	8	95	947

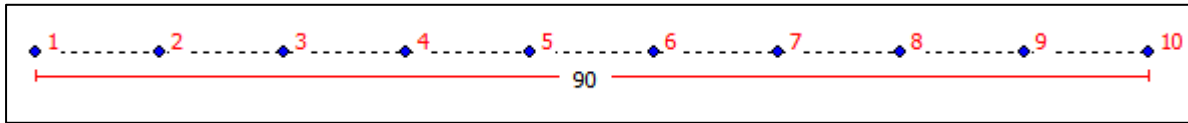


Figura 15: Arreglo lineal 1 x 10, con espaciado de 10 metros entre pozo. Rescatado de EED 4.17.

Notamos que, con disminuir el espaciado entre los pozos, aumenta la longitud total del arreglo, esto se debe a la interferencia térmica entre estos.

De las figuras 14 y 15, que corresponden al reporte de la simulación emitido por el programa, observamos la evolución que tendrán las temperaturas del fluido caloportador a lo largo de 20 años. Debido a la restricción de temperaturas de diseño que se escogió, esta no alcanza valores inferiores a 2°C por lo que se evita el congelamiento del terreno y la necesidad de utilizar anticongelantes.

Demanda base: Temperaturas medias del fluido (al final de mes) [°C]					
Año	1	2	5	10	20
ENE	13,4	13,2	12,3	11,7	11,2
FEB	13,4	13,2	12,4	11,8	11,3
MAR	13,4	12,4	11,5	11	10,4
ABR	13,4	11,6	10,8	10,3	9,75
MAY	13,4	9,96	9,2	8,67	8,13
JUN	13,4	8,96	8,23	7,71	7,17
JUL	13,4	8,82	8,12	7,61	7,07
AGO	13,4	9,28	8,59	8,09	7,56
SEP	11	10,2	9,57	9,07	8,54
OCT	11,6	11	10,3	9,85	9,32
NOV	12,2	11,7	11,1	10,6	10,1
DIC	12,8	12,4	11,7	11,3	10,7

DEMANDA BASE: AÑO 20
 Temperatura mínima media del fluido 7,07 °C al final de JUL
 Temperatura máxima media del fluido 11,3 °C al final de FEB

Figura 16: Variación de las temperaturas medias del fluido caloportador al final de cada mes, en una simulación de 20 años. Rescatado de EED 4.17.

PICO DE DEMANDA DE CALOR: TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO (AL FINAL DE MES) [°C]					
Año	1	2	5	10	20
ENE	13,4	13,2	12,3	11,7	11,2
FEB	13,4	13,2	12,4	11,8	11,3
MAR	13,4	10,3	9,47	8,93	8,38
ABR	13,4	8,16	7,36	6,82	6,28
MAY	13,4	5,23	4,47	3,94	3,4
JUN	13,4	3,86	3,14	2,61	2,08
JUL	13,4	3,71	3,01	2,49	1,96
AGO	13,4	3,95	3,27	2,76	2,23
SEP	6,05	5,25	4,58	4,08	3,55
OCT	7,97	7,38	6,73	6,23	5,71
NOV	9,32	8,84	8,21	7,72	7,2
DIC	11,1	10,7	10,1	9,61	9,09

PICO DE DEMANDA DE CALOR : AÑO 20
 Temperatura mínima media del fluido 1,96 °C al final de JUL
 Temperatura máxima media del fluido 11,3 °C al final de FEB

Figura 17: Variación de la temperatura media del fluido durante las cargas peak de utilización de cada mes, en una simulación de 20 años. Rescatado de EED 4.17.

La tasa de extracción de calor específica del terreno están dadas por:

TASA DE EXTRACCIÓN DE CALOR ESPECÍFICA [w/m]			
Mes	Demanda base	Pico de calefacción P	
ENE	0	0	0
FEB	0	0	0
MAR	2,56	27,2	
ABR	4,54	46	
MAY	9,16	51,9	
JUN	11,6	51,9	
JUL	11,4	51,9	
AGO	9,76	51,9	
SEP	6,82	51,9	
OCT	4,67	47,8	
NOV	2,62	37,3	
DIC	0,96	20,8	

Figura 18: Tasa de extracción de calor específica del terreno para la bomba de calor de alta temperatura. Rescatado de EED 4.17.

4.4.2 Sistema de colectores utilizando la bomba de calor tradicional.

Con las consideraciones explicadas en el apartado 4.3 y considerando un COP 3,4 para la bomba de calor, EED nos entrega una serie de resultados que satisfacen la demanda energética. Se escogió el que tuviera un menos costo y corresponde a un arreglo lineal de 11 pozos, con una profundidad de 93 metros y espaciados 10 metros. La longitud total del arreglo es de 1026 metros.

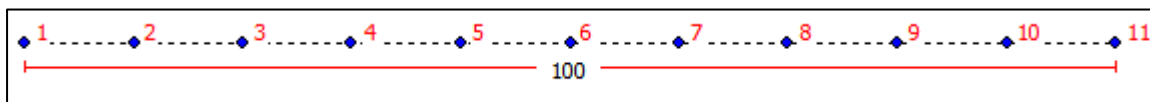


Figura 19: Arreglo lineal 1 x 11, con espaciado de 10 metros entre pozo. Rescatado de EED 4.17.

Es importante destacar que al utilizar una bomba de calor tradicional con un rango de temperaturas de salida más bajo (55°), aumento el COP de esta misma, por lo tanto, de la energía total requerida para la calefacción el terreno debe aportar más energía en comparación con la bomba de calor de alta temperatura (65°), lo que aumenta la longitud total de los intercambiadores.

Respecto a la evolución de las temperaturas medias en el fluido caloportador, como vemos en las figuras 17 y 18, la temperatura del fluido el año 20 no llega a valores cercanos a los 0°C sin embargo en la carga peak

del año 20 en el mes de julio alcanza un valor de 1,96°C, el cual es ligeramente inferior al del mismo periodo con la bomba de calor de alta temperatura (2,08 °C).

Demanda base: Temperaturas medias del fluido (al final de mes) [°C]					
Año	1	2	5	10	20
ENE	13,4	13,2	12,3	11,8	11,2
FEB	13,4	13,3	12,4	11,8	11,3
MAR	13,4	12,4	11,6	11	10,5
ABR	13,4	11,7	10,9	10,3	9,76
MAY	13,4	10	9,24	8,69	8,14
JUN	13,4	9	8,27	7,73	7,18
JUL	13,4	8,87	8,16	7,63	7,08
AGO	13,4	9,32	8,63	8,1	7,56
SEP	11,1	10,3	9,6	9,08	8,54
OCT	11,6	11	10,4	9,86	9,32
NOV	12,3	11,8	11,1	10,6	10,1
DIC	12,8	12,4	11,8	11,3	10,7

DEMANDA BASE: AÑO 20
 Temperatura mínima media del fluido 7,08 °C al final de JUL
 Temperatura máxima media del fluido 11,3 °C al final de FEB

Figura 20: Variación de las temperaturas medias del fluido caloportador al final de cada mes, en una simulación de 20 años. Rescatado de EED 4.17.

PICO DE DEMANDA DE CALOR: TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO (AL FINAL DE MES) [°C]					
Año	1	2	5	10	20
ENE	13,4	13,2	12,3	11,8	11,2
FEB	13,4	13,3	12,4	11,8	11,3
MAR	13,4	10,4	9,51	8,96	8,39
ABR	13,4	8,21	7,4	6,85	6,29
MAY	13,4	5,28	4,52	3,97	3,42
JUN	13,4	3,92	3,18	2,64	2,09
JUL	13,4	3,76	3,05	2,52	1,97
AGO	13,4	4	3,31	2,79	2,24
SEP	6,09	5,29	4,62	4,1	3,56
OCT	8,01	7,42	6,76	6,25	5,71
NOV	9,36	8,88	8,24	7,74	7,2
DIC	11,2	10,7	10,1	9,63	9,09

PICO DE DEMANDA DE CALOR : AÑO 20
 Temperatura mínima media del fluido 1,97 °C al final de JUL
 Temperatura máxima media del fluido 11,3 °C al final de FEB

Figura 21: Variación de la temperatura media del fluido durante las cargas peak de utilización de cada mes, en una simulación de 20 años. Rescatado de EED 4.17.

La tasa de extracción de calor específicas del terreno están dada por la siguiente figura:

TASA DE EXTRACCIÓN DE CALOR ESPECÍFICA [w/m]			
Mes	Demanda base	Pico de calefacción	P
ENE		0	0
FEB		0	0
MAR	2,55	27,1	
ABR	4,53	45,9	
MAY	9,14	51,8	
JUN	11,5	51,8	
JUL	11,4	51,8	
AGO	9,74	51,8	
SEP	6,8	51,8	
OCT	4,66	47,7	
NOV	2,61	37,2	
DIC	0,96	20,7	

Figura 22: Tasas de extracción de calor específica del terreno para el sistema con bomba de calor tradicional.

4.5 Esquema del sistema de captación geotérmico

Para montar el sistema de colectores se escogió una configuración de tuberías directas a sala de máquinas (figura 24). En esta disposición los colectores principales van ubicados dentro de la sala de máquinas, colgando en la pared. Los colectores principales son los encargados de hacer de enlace entre las sondas geotérmicas y la bomba de calor, completando así el circuito de captación geotérmico.

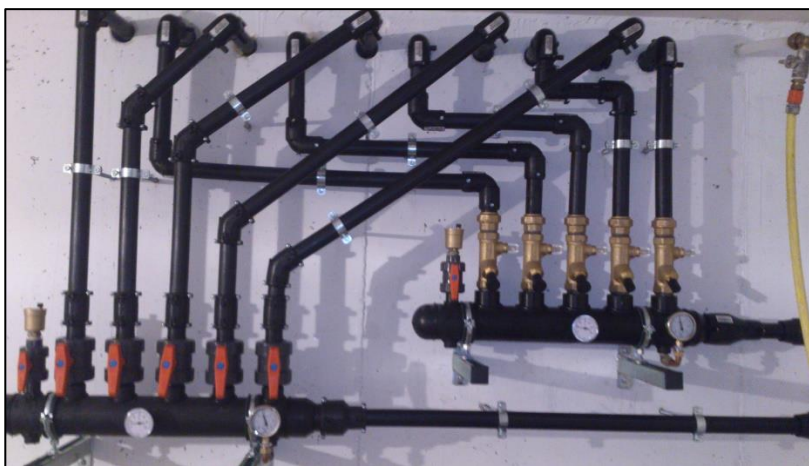


Figura 23: Sistema de colectores principales de ida y de retorno para 5 pozos geotérmicos en una sala de máquinas. Rescatado de <http://www.laboratoriogeocontrol.com>.

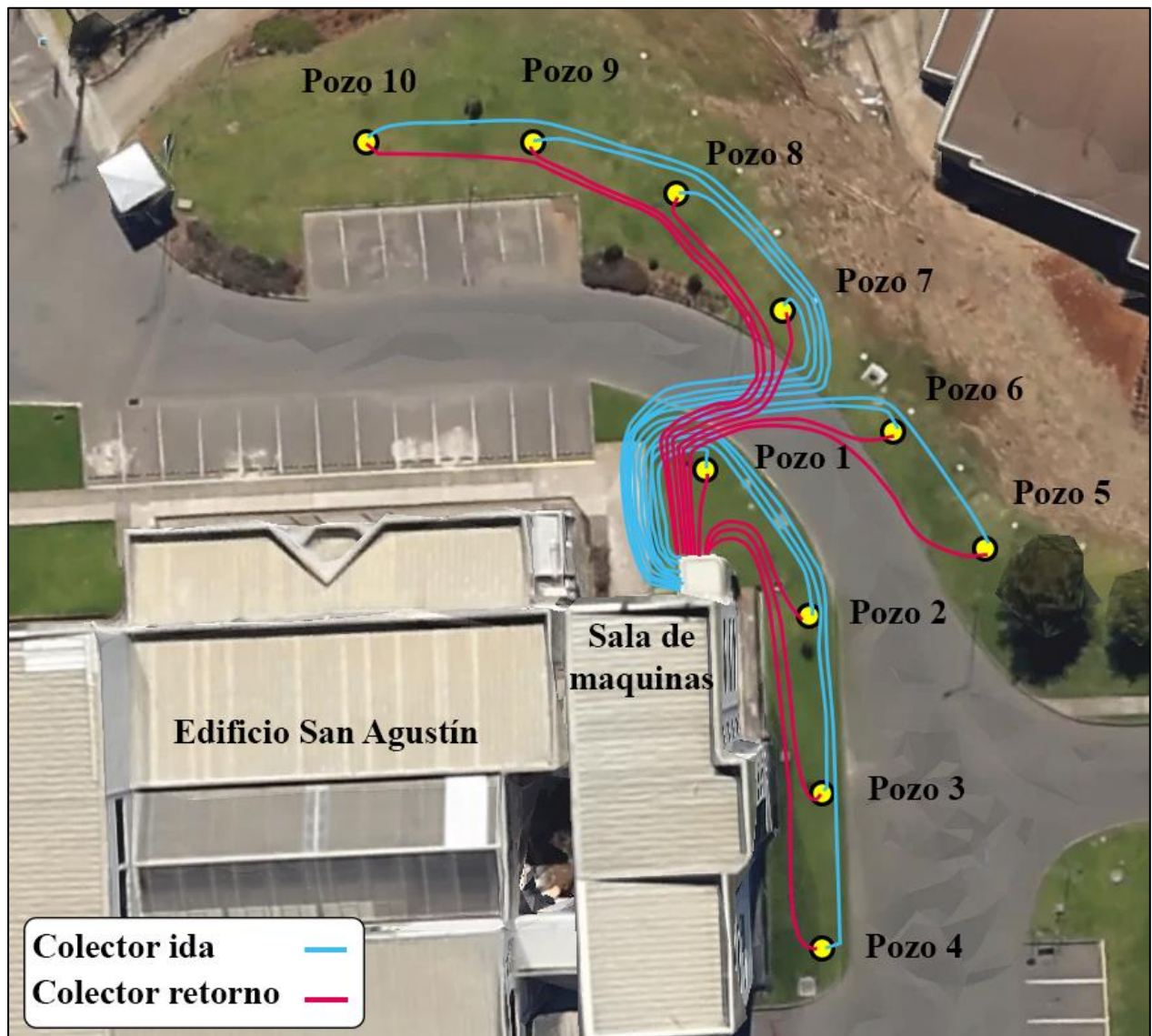


Figura 24: Esquema del sistema de colectores geotérmicos verticales para el edificio San Agustín. Elaboración propia

5. ANALISIS FINANCIERO

5.1 Costos de inversión

Las siguientes tablas resume los principales costos asociados a instalar un sistema de calefacción por bomba de calor geotérmica. Los valores no consideran impuestos, cargos de envío e importación, debido a que la mayoría de los sistemas geotérmicos provienen de países europeos. El valor del euro se consideró a 740 pesos. Tampoco se consideró el valor de la mano de obra.

Tabla 19: Principales costos asociados a la instalación del sistema de calefacción geotérmico con una bomba de calor de alta temperatura.

Ítem y descripción	Unidades	Valor unidad (Pesos)	Valor total (Pesos)
Dimplex SIH 90TU Bomba de calor geotérmica de alta temperatura	1	\$21.275.000	\$21.275.000
Kit de instalación Dimplex Incluye las válvulas seguridad necesarias para acoplar los colectores a la bomba de calor, vaso de expansión, sellos para uniones, manómetro, rejillas de ventilación.	1	\$1.464.560	\$1.464.560
Colector ALB GEROtherm ϕ97 10x32 Elemento del circuito al que acoplan las sondas geotérmicas.	2	\$292.300	\$584.600
Tubo de inyección ϕ32x2,9mm 100m Facilita la operación de llenado del pozo mediante la inyección del material de relleno.	1	\$108.040	\$108.040
Fischer Geosolid 235 Relleno geotérmico para los pozos. Valor por metro cubico.	3,81	\$466.830	\$1.778.622
ALB GEROtherm 4x32mm HSS 100m Sonda geotérmica vertical Doble U, fabricada en polietileno de alta densidad PE100	10	\$491.825	\$4.918.250
Metro lineal de sondeo ϕ 96,7 mm	913	\$25.000	\$22.825.000
Servicio de Bombeo de hormigón Valor por metro cubico bombeado	3,81	\$30.000	\$114.300
		Total	\$53.068.372

Tabla 20: Principales costos asociados a la instalación del sistema de calefacción geotérmico con una bomba de calor de tradicional.

Ítem y descripción	Unidades	Valor unidad (Pesos)	Valor total (Pesos)
Dimplex SI 90TU Bomba de calor geotérmica tradicional	1	\$15.993.900	\$15.993.900
Kit de instalación Dimplex Incluye las válvulas seguridad necesarias para acoplar los colectores a la bomba de calor, vaso de expansión, sellos para uniones, manómetro, rejillas de ventilación.	1	\$1.464.560	\$1.464.560
Colector ALB GEROtherm ϕ97 11x32 Elemento del circuito al que acoplan las sondas geotérmicas.	2	\$292.300	\$584.600
Tubo de inyección ϕ32x2,9mm 100m Facilita la operación de llenado del pozo mediante la inyección del material de relleno.	1	\$108.040	\$108.040
Fischer Geosolid 235 Relleno geotérmico para los pozos. Valor por metro cubico.	4,28	\$466.830	\$1.998.032
ALB GEROtherm 4x32mm HSS 100m Sonda geotérmica vertical Doble U, fabricada en polietileno de alta densidad PE100	11	\$491.825	\$5.410.075
Metro lineal de sondeo ϕ 96,7 mm	1026	\$25.000	\$25.650.000
Servicio de Bombeo de hormigón Valor por metro cubico bombeado	4,28	\$30.000	\$128.400
		Total	\$51.337.607

Para poder utilizar una bomba de calor tradicional, que trabaje a bajas temperaturas, debemos agregar al coste de inversión el valor de renovar todos los radiadores tradicionales del edificio por radiadores *LOW H₂O*. El Anexo 3 detalla el cálculo del número de radiadores necesarios.

Las siguientes tablas detallan la cantidad de radiadores necesarios en cada edificio, así como su modelo y valores.

Tabla 21: Cantidad y costo asociado a renovar el sistema de radiadores del edificio de profesores. Los radiadores corresponden a modelos *LOW H₂O* de la marca JAGA.

Modelo	Unidades	Valor unidad (Pesos)	Valor total (Pesos)
Tempo pared 30x40x15	30	\$98.420	\$2.952.600
Tempo pared 40x40x20	4	\$122.840	\$491.360
Tempo pared 50x40x15	7	\$113.960	\$797.720
Tempo pared 40x50x20	3	\$134.754	\$404.262
Tempo pared 40x60x20	1	\$147.186	\$147.186

Tempo pared 60x70x20	1	\$190.180	\$190.180
		Total	\$4.983.308

Tabla 22: Cantidad y costo asociado a renovar el sistema de radiadores del edificio de salas. Los radiadores corresponden a modelos *LOW H₂O* de la marca JAGA.

Modelo	Unidades	Valor unidad (Pesos)	Valor total (Pesos)
Tempo pared 30x40x20	4	\$114.922	\$459.688
Tempo pared 40x40x20	4	\$122.840	\$491.360
Tempo pared 40x60x20	1	\$147.186	\$147.186
Tempo pared 60x70x20	1	\$190.180	\$190.180
Tempo pared 60x110x20	6	\$256.780	\$1.540.680
Tempo pared 60x120x20	10	\$270.766	\$2.707.660
Tempo pared 60x140x20	2	\$323.380	\$646.760
Tempo pared 60x160x20	1	\$377.400	\$377.400
Tempo pared 50x200x20	4	\$429.200	\$1.716.800
Tempo pared 60x220x20	4	\$507.640	\$2.030.560
		Total	\$10.308.274

Finalmente los costó de inversión totales, para ambos casos serian:

Tipo de sistema	Valor total
Con bomba de calor de alta temperatura	\$53.068.372
Con bomba de calor tradicional + la renovación de radiadores	\$66.629.189

5.2 Análisis de rentabilidad

El beneficio económico que presenta una bomba de calor se obtiene en la forma de ahorro energético. Este ahorro energético se produce en el momento en el que se obtiene una energía térmica a un precio inferior al que se puede obtener con tecnologías tradicionales. Pero para obtener este ahorro energético es necesario realizar una importante inversión inicial, superior al requerido para la instalación de tecnologías tradicionales.

La bomba de calor solo se amortizará mediante el ahorro energético que obtiene, por lo tanto, a medida que aumenta el rendimiento COP de la BCG, mayor será el ahorro energético que se pueda obtener.

La metodología tradicional para evaluar este ahorro energético y económico es el VAN o valor actualizado neto, el cual representa el beneficio o pérdida total del proyecto teniendo en cuenta toda la vida de la instalación.

Para el cálculo del VAN, se utiliza la siguiente ecuación (Conde, 2009):

$$VAN = Inversion + \sum_{t=1}^{t=T} \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

Donde:

T, es el tiempo de vida de la instalación (en años)

r, es la tasa de descuento.

FC_t , son los flujos de caja netos en cada año.

El valor de la tasa interna de retorno (TIR) corresponde a aquella tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. En proyectos que requieren grandes inversiones iniciales como este, se consideran rentables aquellos cuando la TIR sea superior a la tasa de descuento del mercado. La tasa de descuento típica para proyectos de este tipo es de 6% (Conde *et al.*, 2009).

Para los proyectos de climatización geotérmica el flujo de caja neto corresponde al ahorro energético del sistema de BCG respecto a las calderas a gas que posee la facultad.

Lo obtendremos mediante la ecuación:

$$FC = Q_t \cdot C_t - Q_e \cdot C_e \quad (11)$$

Donde:

Q_t , es la energía térmica total necesaria para calefactar el edificio durante 1 año, 67642 [kWh]

Q_e , corresponde a la energía eléctrica consumida por el compresor de la BCG durante 1 año [kWh].

C_e , es el coste de la energía eléctrica [\$/kWh].

C_t , es el coste de la energía térmica tradicional, en nuestro caso gas natural [\$/kWh].

5.2.1 Costos de funcionamiento de la caldera.

El edificio San Agustín alimenta sus calderas con gas natural 9300, el cual tiene un poder calorífico superior de 9300 [kcal/m³], lo que equivale a 10,8085 [kWh/m³], este valor corresponde a la cantidad de energía que entrega un volumen de gas cuando se combustiona de manera perfecta. Sin embargo, en una caldera tradicional solo se obtiene alrededor de 8400 [kcal/m³], lo que equivale a 9,76248 [kWh/m³].

La tarifa de gas varía según el volumen consumido, para el caso de la facultad tiene un valor promedio de 956,5 [\$/m³].

Conociendo estas cifras podemos calcular el valor que tendría 1 kWh a partir de gas natural, ya que si 1 m³ de gas cuesta 956,5 Pesos y entrega 9,76248 [kWh], entonces 1 [kWh] tendría un valor de 98 Pesos.

De esta manera el coste anual de funcionamiento de la caldera (C_c) para cubrir la demanda energética esta dado por la expresión:

$$C_c = Q_t \cdot C_t = 67642(\text{kWh}) \cdot 98(\$/\text{kWh}) = \$ 6.628.920 \quad (12)$$

5.2.2 Energía eléctrica consumida por el compresor

El valor promedio del kWh eléctrico en para la universidad es 100 [\$/KWh] (Hidalgo, 2017). El coste anual de funcionamiento de la BCG (C_{BCG}) para cubrir la demanda energética esta dado por la expresión:

$$C_{BCG} = Q_e \cdot C_e \quad (13)$$

La energía eléctrica consumida por el compresor (Q_e) de la BCG se puede estimar mediante la ecuación:

$$Q_e = \frac{Q_t}{COP} \quad (14)$$

Donde Q_t es la energía térmica total anual entregada por la BCG este valor es de 67642 [kWh].

De esta manera para ambas BCG utilizando las expresiones (13) y (14) obtenemos el consumo eléctrico anual del compresor y costo anual asociado.

Tabla 23: Valores y costos de energía eléctrica anual consumida por el compresor de la BCG.

Tipo de BCG	COP	Q_e [kWh]	Costo anual [€]
Alta temperatura	2,7	25052,59	\$2.505.259
Tradicional	3,4	19894,71	\$1.989.471

Notamos que la BCG tradicional consume un 20,59 % menos energía que la BCG de alta temperatura.

5.2.3 Flujo de caja neto

Finalmente, con los datos calculados en los apartados anteriores y utilizando la ecuación (11), obtenemos el flujo de caja neto, producto del ahorro en los costes operacionales del sistema de calefacción.

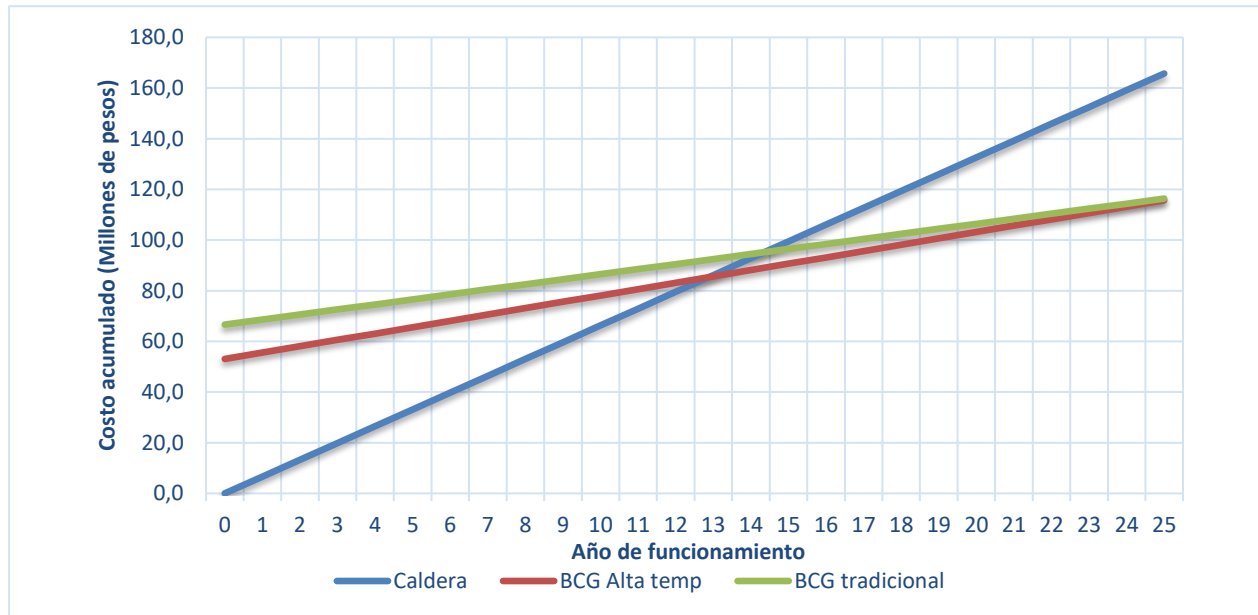
Tabla 24: Flujos de caja neto anuales para ambos sistemas.

	Tipo BCG	
	Alta temperatura	Tradicional
Costo de operación anual caldera	\$6.628.920	\$6.628.920
Costo de operación anual BCG	\$2.505.259	\$1.989.471
Flujo de caja neto anual	\$4.123.661	\$4.639.449

5.2.4 Evolución de los costes de funcionamiento

El siguiente gráfico compara la evolución anual de los costes acumulados de funcionamiento e inversión inicial, de los sistemas geotérmicos respecto al sistema de caldera a gas natural.

Gráfico 7: Evolución y comparación de los costos anuales de funcionamiento de los sistemas de calefacción. Elaboración propia.



Como podemos observar el periodo de retorno sin tasas de descuento para el sistema con BCG de alta temperatura sería a partir del año 13, mientras que para el sistema con BCG tradicional sería a partir del año 14. También notamos que la BCG tradicional eventualmente alcanzara costos acumulados menores que la BCG de alta temperatura, esto ocurriría a partir del año 25 del funcionamiento. A la hora de calcular esta gráfica no se consideró el coste que tuvo la inversión inicial del sistema de calderas a gas natural, tampoco se consideraron costos de mantenimiento o variaciones en los costes de la energía eléctrica o gas natural de ambos sistemas.

5.2.5 Valor actualizado neto

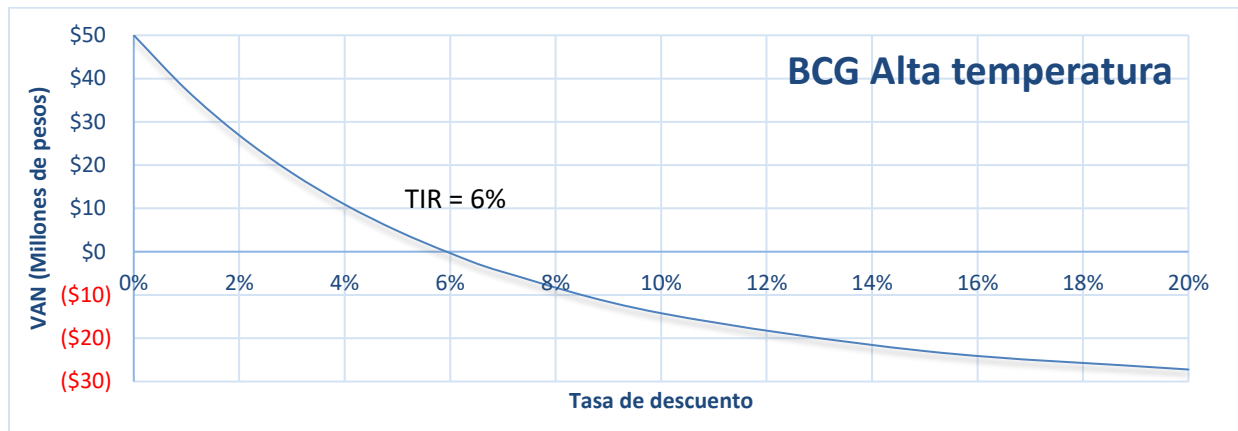
Según datos del fabricante el tiempo de vida del compresor de la BCG es de por lo menos 25 años, las sondas geotérmicas según su catálogo están diseñadas para durar más de 100 años. Por lo tanto, se realizó el cálculo del VAN a 25 años. La tasa de descuento típica para proyectos de este tipo es de 6% (Conde *et al.*, 2009).

De esta manera para la bomba de calor de alta temperatura, la ecuación (10) quedaría de la siguiente manera:

$$VAN = -53.068.372 + \sum_{t=1}^{t=25} \frac{4.123.661_t}{(1+r)^t}$$

El grafico 8 resume los resultados del VAN según distintas tasas de descuento, con una tasa de descuento del 6% se obtuvo un VAN = \$ -334.102. Para este caso la TIR es igual a la tasa de descuento de mercado. Lo que indica que el proyecto resultaría rentable.

Grafico 8: Variación del VAN respecto a la tasa de descuento para el sistema de BCG de alta temperatura. Elaboración propia.

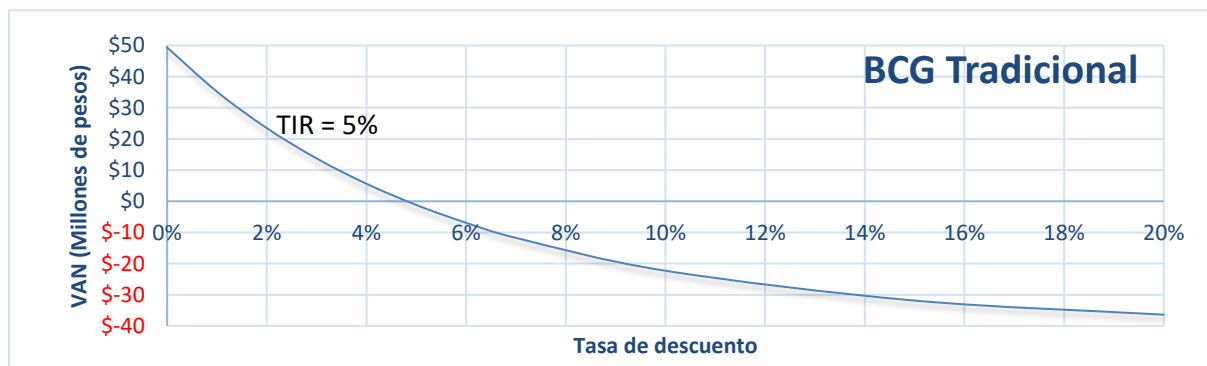


Para la bomba de calor tradicional la ecuación (10) quedaría de la siguiente manera:

$$VAN = -66.629.189 + \sum_{t=1}^{t=25} \frac{4.639.449_t}{(1+0,06)^t}$$

El grafico 9 resume El grafico 8 resume los resultados del VAN según distintas tasas de descuento, con una tasa de descuento del 6% se obtuvo un VAN = \$ -6.907.033 En este caso la TIR es de 5%, lo que nos indica que el proyecto no es rentable al no alcanzar la tasa de descuento del mercado de 6%.

Grafico 9: Variación del VAN respecto a la tasa de descuento para el sistema de BCG tradicional. Elaboración propia.



6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Del análisis financiero es importante destacar que implementar una BCG de alta temperatura, permite ahorros de inversión 35% menores que la BCG tradicional

Si analizamos la distribución de los costos de inversión para ambos sistemas en el grafico 7, notamos que para ambos casos alrededor de un 40% del coste de inversión total del proyecto se debe al coste de los sondajes. Este valor depende exclusivamente de la longitud total necesaria para el sistema de captación.

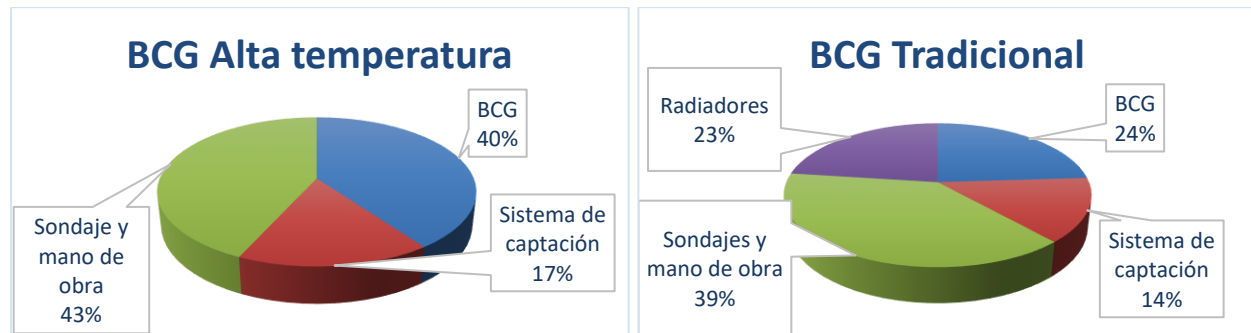
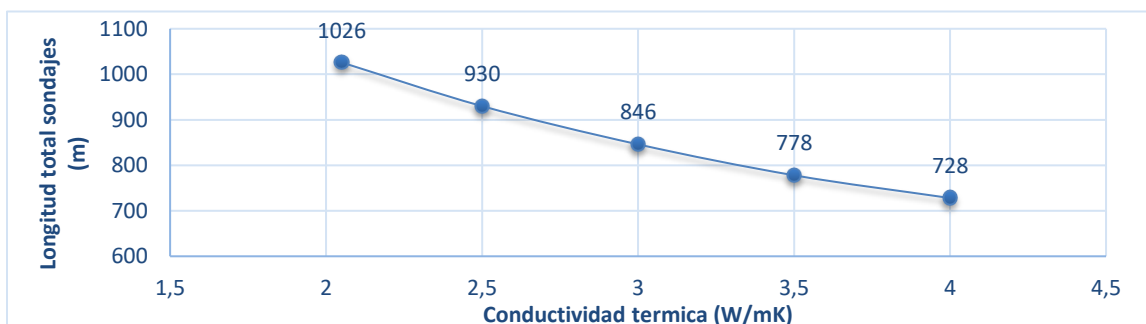


Gráfico 10: Distribución de los costos de inversión para ambos casos estudiados. Elaboración propia.

Por otro lado, la longitud total necesaria en los pozos de captación depende directamente del valor de conductividad térmica del terreno, en nuestro caso el valor considerado fue de $2,05 [W/m \cdot K]$, el cual es un valor bajo. Según la base de datos del software EED, para roca arenisca, la principal roca en el subsuelo de la facultad, la conductividad térmica esta entre un rango de $1,25$ a $5,10 [W/m \cdot K]$. La única forma exacta de conocer este valor es mediante un test de respuesta térmica y para ello es necesario realizar un sondaje de prueba.

A modo de ejemplo se hizo variar la conductividad térmica del terreno, considerando las demandas energéticas del edificio San Agustín, utilizando la bomba de calor tradicional con COP 3.4. Como podemos apreciar en el gráfico 8, si el terreno tuviera una conductividad térmica cercana a $3 [W/m \cdot K]$, solo se necesitarían 846 metros de sondaje, esto corresponde a un 17,5% menos que la longitud considerada en este caso y significaría un ahorro en la inversión en términos de sondajes de 4.5 millones de pesos.

Gráfico 11: Variación de la longitud total de los sondajes respecto a la conductividad térmica en el terreno considerando los parámetros de la bomba de calor tradicional. Elaboración propia.

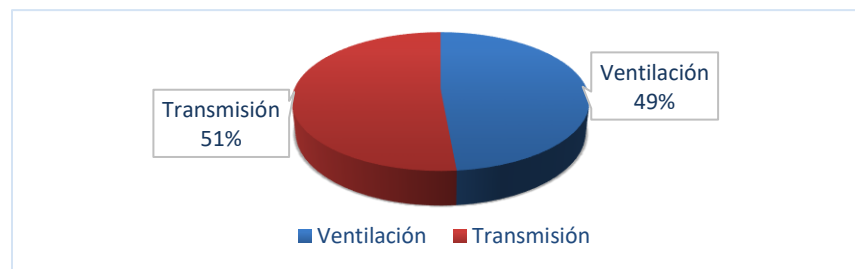


Otro factor importante y que no se consideró en el cálculo del VAN y TIR, es las alzas que podrían presentar las tarifas de gas natural durante el periodo evaluado, lamentablemente debido a la inestabilidad que presento el valor en los últimos años no se encontró una tendencia generalizada al alza. Pero al ser un combustible fósil y no renovable es de suponer que, dado el crecimiento mundial, se tienda a agotar y aumentar su valor. Esta consideración aumentaría el valor del flujo de caja neto.

Tampoco se consideró en el cálculo del VAN y TIR, la posible rebaja en la tarifa eléctrica en nuestro país, actualmente se están generando importantes proyectos que aprovechan energías renovables no convencionales, como lo son la solar y eólica. Y aún hay bastantes proyectos en desarrollo. Según un artículo publicado en la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, Industria y Minería, el gobierno espera rebajas de un 20% en la tarifa eléctrica a partir del año 2021. Esta rebaja llevaría a aumentar el valor del flujo de caja neto.

Ahora si nos volcamos a la raíz del problema, se recomienda “sanear energéticamente” un edificio antes de instalar un sistema como la BCG. Este término se refiere a disminuir las pérdidas energéticas directamente en su origen. Si analizamos el gráfico 9, un 49% de las pérdidas energéticas del edificio durante el mes de julio se deben exclusivamente a la ventilación de este. O sea la mitad de la energía que el sistema geotérmico necesitaría cubrir, dadas las condiciones actuales, se podría ahorrar con la instalación de un sistema de aire acondicionado que evitara ventilar las aulas y oficinas abriendo las ventanas de estas. El cálculo de un sistema de aire acondicionado esta fuera de lo alcances de esta investigación, sin embargo, la BCG es compatible con estos sistemas.

Gráfico 12: Pérdidas energéticas durante el mes de julio para el edificio San Agustín. Elaboración propia.

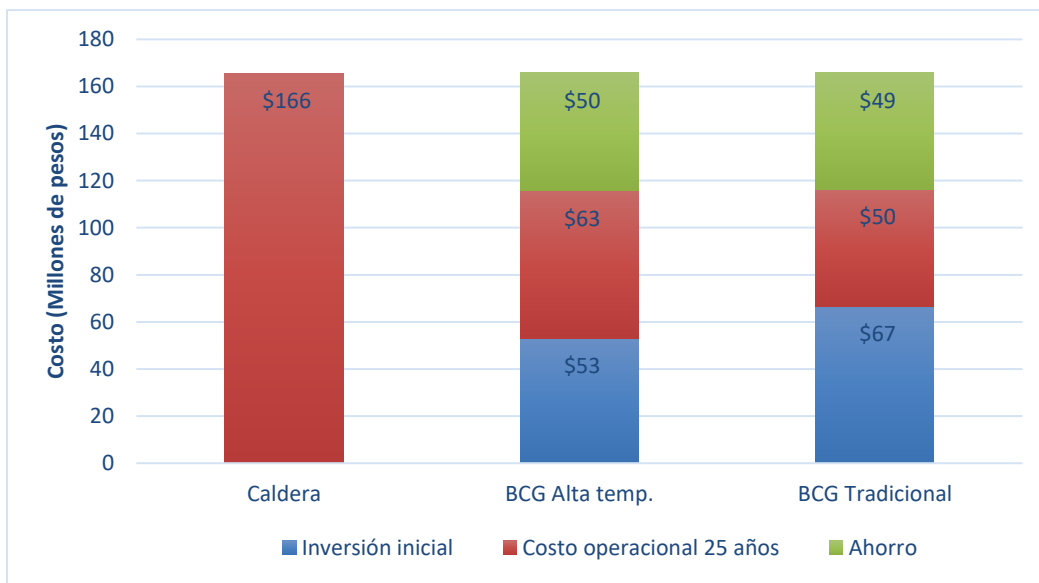


7. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha demostrado como implementar un sistema de calefacción mediante una bomba de calor geotérmica, logra ahorros energéticos de hasta un 70% respecto al sistema de calderas gas natural. Este ahorro además de disminuir las cuentas anuales de calefacción desde 6,6 a 2,5 millones de pesos, evitaría la combustión de 7000 m³ anuales de gas natural. Lo cual indiscutiblemente es una mejora medioambiental.

Si no consideramos las tasas de descuento, los dos sistemas geotérmicos nos generan un ahorro respecto a la caldera a gas durante un periodo de 25 años. En el gráfico 13 se aprecia que al utilizar la BCG de alta temperatura, luego de amortizarse el año 13, genera ahorros de hasta 50 millones de pesos por los 12 años siguientes. Mientras que la BCG tradicional, luego de amortizarse el año 14, genera ahorros de hasta 49 millones de pesos por los 12 años siguientes. Desde este punto de vista la implementación de la BCG de alta temperatura sería la alternativa más rentable al generarnos un 30% de ahorros respecto a la caldera a gas durante 25 años de funcionamiento.

Gráfico 13: Comparación de los costes de funcionamiento e inversión durante 25 años para los 3 sistemas. Elaboración propia.



Por otro lado, desde el punto de vista de la eficiencia energética, el edificio San Agustín presente graves falencias energéticas debido a las pérdidas por ventilación e infiltración. Si se estudiara en detalle cómo disminuir estas pérdidas, la energía térmica que el sistema geotérmico necesita extraer del terreno disminuiría, lo que reduciría los costos asociados a perforación, además de que las BCG de potencias menores son más económicas. Desde mi punto de vista, este sería el camino recomendado a seguir por la universidad, si se desea seguir una línea de eficiencia energética que además contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, que aceleran el calentamiento global.

8. REFERENCIAS

ALB (2008), Sistema de geotermia, Catalogo ALB sistemas. <http://www.alb.es>.

Blomberg T., Claesson J., Eskilson P., Hellstrom G., Sanner B., (2015). Earth Energy Designer (EED) v3.2 User manual. BLOCON. <http://www.buildingphysics.com>.

Cengel Y., Boles M., (2011). Termodinámica. Séptima edición. México. Editorial McGraw-Hill.

CERES (2016). Análisis comparativo de las tarifas electrica en la Argentina y en América del Sur. Centro de Estudio de la Regulación Económica de los Servicios Públicos. Universidad de Belgrano.

CITEC UBB (2012) Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos. Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción. Universidad del Bío Bío. Concepción. Chile.

Conde C., Ramos A., Reina P., Vega A., et al., (2009). Guía técnica de bombas de calor geotérmicas. Serie GeoEner. Madrid. España. Graficas Arias Montano S.A.

Dimplex (2009). Manual de planificación e instalación de bombas de calor para calefacción y preparación de agua caliente. www.dimplex.de.

Enertres (2014). Catálogo Enertres. Sistemas integrales de climatización con energías renovables. <http://www.enertres.com>.

Ericsson L., (1985). Heat Exchange Between Crystalline Bedrock and Borehole in an Energy Well System. Department of Geology. Chalmers University of Technology. Sweden.

Gehlin S., (2002). Thermal Response Test. Method Development and Evaluation. Doctoral Thesis. Department of Environmental Engineering. Division of Water Resources Engineering. Lulea University of Technology. Sweden.

Grimm R., (2015). Geotermia aplicada a la edificación. Cámara Chileno-Alemana CAMCHAL. Santiago. Chile.

Hellstrom G., (1988). Thermal Performance of Borehole Heat Exchangers. Department of Mathematical Physics. Lund Institute of Technology. Sweden.

Higon J.L., (2017). Consulta técnica via email a traves de Felipe Matamala. Ingeniero de Energesis Group. España.

IDAE (2012). Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. Serie “Calificación de eficiencia energética en edificios”. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Madrid. España.

LGM (2011). Informe de ingeniería geotécnica edificio matemática y física UCSC, Concepción. Laboratorio de geomateriales. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

LGM (2011). Informe de ingeniera geotécnica Edificio SAE UCSC, Concepción. Laboratorio de geomateriales. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Llopis G., López C., Franqueza J., (2009). Guía Técnica de Sondeos Superficiales. Serie GeoEner. Madrid. España. Graficas Arias Montano S.A.

Matamala F., (2017). Consultas técnicas sobre geotermia y costes de sondajes. Ingeniero en jefe de Liem Ltda.

Muñoz R., (2017). Calculo de la envolvente térmica del edificio de la facultad de ingeniería de la universidad católica de la santísima concepción. Informe de proyecto de título para optar al título de ingeniero civil. Concepción. Chile. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Pous J., Jutglar Ll., (2004). Energía Geotérmica. Barcelona. España. Ediciones Ceac.

Quezada J., (1996). Geología Urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción. Chile.

RITCH (2007). Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios en Chile. Cámara chilena de Refrigeración y Climatización A. G. Division Técnica de Aire Acondicionado y Refrigeración. Santiago. Chile.

RITE (2013). Reglamento de instalaciones térmicas en la edificación. Ministerio de Industria. Energía y Turismo. Secretaria de Estado de Energía. Dirección General de Política Energética y Minas. Madrid. España.

Tester J., Anderson B., Batchelor A., Blackwell D., DiPippo R., et al (2006). The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st. Idaho National Laboratory. Idaho. U.S.

Yañez C., (2017). Estudio comparativo del recambio de calefactores a leña por sistema eléctrico. Corporación de Desarrollo Tecnológico. Enel Distribución. Santiago. Chile.

Uponor (2013). Geotermia. Información técnica. Descargado de www.uponor.es.

Villajos J.; Ramírez P.; Fonseca, A., (2010). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción. Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental 12. 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.

Normas consultadas:

UNE100715-1 (2014). Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical. Comité técnico AEN/CTN 100 *Climatización*. Madrid. España.

UNE 10011 (1991). Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de locales. Comité técnico AEN/CTN 100 *Climatización*. Madrid. España.

UNE-EN 13779 (2008). Ventilación de los edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos. Comité técnico AEN/CTN 100 *Climatización*. Madrid. España.

UNE-EN ISO 7730 (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. Comité técnico AEN/CTN 81 *Prevención y Medios de Protección Personal y Colectiva en el Trabajo*. Madrid. España.

Páginas web consultadas:

Explorador Solar Chile (2017) Ministerio de Energía. Gobierno de Chile.
<http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

GEOTERMICA ENERGIA (2012). Estudio de Ingeniería en colaboración con ARGADI INGENIEROS S.L. <http://energiarenovablegeotermica.blogspot.cl/>.

Groenholland. Geo Energy System GroenHolland. <http://www.groenholland.com>.

Ingemecánica. Ingeniería, Consultoría y Formación. Tutorial N°255-Guía para el Cálculo de las Cargas térmicas en los Edificios. <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn255.html>.

Jaga. Empresa dedicada a la fabricación de radiadores. Radiadores LOW- H_2O .
<http://www.elradiadormaseconomico.es/>

Minenergía (2016). Histórica licitación de suministro eléctrico. Ministerio de energía. Chile.
<http://www.energia.gob.cl/tema-de-interes/historica-licitacion-de-0>

MMA (2017). Programa de recambio de calefactores. Ministerio del Medio Ambiente. Chile.
<http://calefactores.mma.gob.cl/>

Optivent 2.0 (2015). Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción. Universidad del Bío Bío. Concepción. Chile. <http://optivent.ubiobio.cl/Concepcion/>.

9. Anexo 1: Bases de datos climáticas

9.1 Radiación solar incidente

La radiación solar incidente se obtuvo de la herramienta web “Explorador Solar Chile” para la ubicación geográfica del edificio San Agustín. El programa permite obtener los valores promedios mensuales horarios de radiación global incidente sobre una superficie, dadas una orientación (acimut) e inclinación. Se consideraron las orientaciones norte, sur, este, oeste y además una orientación horizontal para las cubiertas del edificio.

Tabla 25: Ciclos diarios mensuales de radiación global en una orientación norte con una inclinación de 90°. Fuente: Explorador Solar Chile

Ciclos diarios-mensuales de radiación global en orientación norte con una inclinación de 90° [W/m ²]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6:00	22	4	0	0	0	0	0	0	0	13	32	34
7:00	61	42	35	17	0	0	0	3	52	59	73	73
8:00	98	100	159	170	120	84	91	133	175	162	122	107
9:00	166	218	298	308	249	227	211	244	304	275	222	159
10:00	266	320	414	436	344	332	332	346	415	356	318	255
11:00	347	419	509	513	437	409	408	417	496	423	387	324
12:00	396	470	561	550	478	459	422	465	515	469	426	366
13:00	405	486	567	563	478	452	423	461	507	455	405	362
14:00	367	455	530	518	427	413	391	416	464	399	351	313
15:00	288	374	448	432	375	383	352	369	392	322	265	233
16:00	182	260	330	312	241	266	237	261	274	208	152	130
17:00	104	130	180	159	79	6	84	133	131	88	86	97
18:00	65	52	43	3	0	0	0	0	12	27	46	60
19:00	27	12	0	0	0	0	0	0	0	0	6	23
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 26: Ciclos diarios mensuales de radiación global en una orientación este con una inclinación de 90°. Fuente: Explorador Solar Chile

Ciclos diarios-mensuales de radiación global en orientación este con una inclinación de 90° [W/m ²]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	311
6:00	237	41	0	0	0	0	0	0	0	128	303	501
7:00	485	391	270	62	0	0	0	7	227	369	512	595

Tabla 28: Ciclos diarios mensuales de radiación global en una orientación sur con una inclinación de 90°. Fuente: Explorador Solar Chile.

Ciclos diarios-mensuales de radiación global en orientación sur con una inclinación de 90° [W/m ²]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6:00	106	16	0	0	0	0	0	0	0	34	111	141
7:00	159	85	25	6	0	0	0	1	23	58	133	173
8:00	141	83	63	41	22	13	14	30	61	90	114	151
9:00	129	114	96	75	53	40	42	62	95	122	135	130
10:00	151	136	121	100	77	66	69	84	120	138	161	156
11:00	169	159	138	117	93	85	86	103	135	157	178	174
12:00	186	171	148	124	99	91	95	114	145	166	188	186
13:00	184	171	150	125	98	89	94	113	141	162	179	186
14:00	177	165	142	115	88	80	84	104	131	150	168	172
15:00	158	149	126	97	74	64	71	90	115	134	148	153
16:00	135	124	99	70	45	38	43	62	86	104	121	130
17:00	147	91	66	35	13	6	14	29	47	68	137	180
18:00	177	92	27	2	0	0	0	0	8	61	147	200
19:00	143	51	0	0	0	0	0	0	0	0	35	144

Tabla 29: Ciclos diarios mensuales de radiación global en una superficie horizontal Fuente: Explorador Solar Chile.

Ciclos diarios-mensuales de radiación global en una superficie horizontal [W/m ²]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6:00	57	8	0	0	0	0	0	0	0	30	91	98
7:00	211	131	63	12	0	0	0	2	59	91	257	258
8:00	398	310	227	128	56	28	33	83	200	158	440	434
9:00	567	482	397	268	161	117	121	194	350	481	585	576
10:00	711	615	537	398	251	209	221	294	478	583	723	728
11:00	825	750	649	482	332	276	293	371	572	672	822	825
12:00	893	819	709	522	368	318	318	420	600	734	884	896
13:00	915	844	719	532	365	311	318	416	588	716	859	894
14:00	868	807	673	481	317	272	281	371	538	646	787	831
15:00	768	706	576	386	254	219	231	312	451	552	679	730

16:00	626	552	434	258	136	118	129	199	312	400	521	584
17:00	444	372	251	107	30	10	32	74	146	223	326	406
18:00	243	180	79	3	0	0	0	0	17	74	149	219
19:00	75	28	0	0	0	0	0	0	0	0	13	62

9.2 Temperaturas exteriores

La base de datos para las temperaturas medias horarias mensuales corresponde a la herramienta Optivent 2.0, cuya fuente es EnergyPlus weather Data para Chile, para la ciudad de Concepción.

Tabla 30: Temperaturas medias horarias según mes para la ciudad de concepción. Fuente EnergyPlus weather data.

Temperatura media horaria mensual °C												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6	11,6	11,1	10,6	9,8	9,2	7,9	7,3	7,9	7,7	8,3	9,6	11,2
7	12,65	11,65	10,6	9,7	9,1	7,9	7,2	7,85	7,65	8,9	10,6	12,4
8	13,7	12,2	10,6	9,6	9	7,9	7,1	7,8	7,6	9,5	11,6	13,6
9	16,05	14,55	12,85	10,95	9,7	8,5	7,65	8,5	8,95	11,25	13,4	15,35
10	18,4	16,9	15,1	12,3	10,4	9,1	8,2	9,2	10,3	13	15,2	17,1
11	19,65	18,4	17,1	13,95	11,75	9,95	9,15	10,55	11,6	14	16,05	18,2
12	20,9	19,9	19,1	15,6	13,1	10,8	10,1	11,9	12,9	15	16,9	19,3
13	21,5	20,75	19,9	16,35	13,75	11,6	10,85	12,45	13,4	15,55	17,45	19,85
14	22,1	21,6	20,7	17,1	14,4	12,4	11,6	13	13,9	16,1	18	20,4
15	22,2	21,9	20,75	17,1	14,45	12,65	11,95	13,15	13,95	16,2	18	20,45
16	22,3	22,2	20,8	17,1	14,5	12,9	12,3	13,3	14	16,3	18	20,5
17	21,7	21,7	20	16,45	13,75	12,3	11,85	12,85	13,65	15,85	17,5	19,9
18	21,1	21,2	19,2	15,8	13	11,7	11,4	12,4	13,3	15,4	17	19,3
19	19,85	19,8	17,75	14,7	12,25	10,8	10,55	11,55	12,4	14,3	15,9	18,4
20	18,6	18,4	16,3	13,6	11,5	9,9	9,7	10,7	11,5	13,2	14,8	17,5
21	17,2	17,1	15,55	12,9	11,05	9,55	9,25	10,2	10,9	12,4	13,95	16,35
22	15,8	15,8	14,8	12,2	10,6	9,2	8,8	9,7	10,3	11,6	13,1	15,2

9.3 Humedad relativa exterior

La base de datos para las humedades relativas medias horarias mensuales corresponde a la herramienta Optivent 2.0, cuya fuente es EnergyPlus weather Data para Chile, para la ciudad de Concepción.

Tabla 31: Temperaturas medias horarias según mes para la ciudad de concepción. Fuente EnergyPlus weather data.

Humedad relativa del aire media horaria mensual %												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6	93,8	94,5	94,8	95,1	94,8	94,2	90	89,6	87,9	94,4	92,9	94
7	89,55	93,9	94,25	94,85	94,25	93,9	90,3	88,7	87,35	93,1	89,2	90,15
8	85,3	93,3	93,7	94,6	93,7	93,6	90,6	87,8	86,8	91,8	85,5	86,3
9	75,7	83,85	85,85	91,2	92,3	91,35	89,4	85,95	82,1	86,15	77,1	78,25
10	66,1	74,4	78	87,8	90,9	89,1	88,2	84,1	77,4	80,5	68,7	70,2
11	61,75	69	69,85	82,55	85,5	85,2	84,8	78,9	72,75	75,85	65,7	66,8
12	57,4	63,6	61,7	77,3	80,1	81,3	81,4	73,7	68,1	71,2	62,7	63,4
13	56,3	60,9	59,5	74,45	77,6	79,4	78,75	72,3	66,95	70	60,55	61,9
14	55,2	58,2	57,3	71,6	75,1	77,5	76,1	70,9	65,8	68,8	58,4	60,4
15	55,25	57,5	57,7	72,25	75,85	77,1	75,25	71,15	66,9	69,15	58,85	60,75
16	55,3	56,8	58,1	72,9	76,6	76,7	74,4	71,4	68	69,5	59,3	61,1
17	56,9	58,1	61,55	75,55	80,3	80,5	77,6	74,55	70,1	72,05	61,75	63
18	58,5	59,4	65	78,2	84	84,3	80,8	77,7	72,2	74,6	64,2	64,9
19	62,85	63,95	71,45	82,5	87,1	87,3	84,7	81,95	76,1	78,85	69,4	68,45
20	67,2	68,5	77,9	86,8	90,2	90,3	88,6	86,2	80	83,1	74,6	72
21	73,25	73,85	81,55	89,35	91,4	91,45	88,95	87,85	82,1	85,95	79,05	77,25
22	79,3	79,2	85,2	91,9	92,6	92,6	89,3	89,5	84,2	88,8	83,5	82,5

9.4 Velocidad del viento

La base de datos para la velocidad del viento media horaria mensuales corresponde a la herramienta Optivent 2.0, cuya fuente es EnergyPlus weather Data para Chile, para la ciudad de Concepción.

Tabla 32: Temperaturas medias horarias según mes para la ciudad de concepción. Fuente EnergyPlus weather data.

Velocidad media del viento horaria mensual [m/s]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
6	1,7	2	1,4	1,5	2,6	3,1	3,2	3,5	3	1,8	2,2	1,6
7	1,8	2,05	1,4	1,4	2,55	3,05	3,3	3,6	2,9	2	2,25	1,8
8	1,9	2,1	1,4	1,3	2,5	3	3,4	3,7	2,8	2,2	2,3	2
9	2,65	2,7	2,05	1,7	2,65	2,9	3,55	3,75	2,95	2,75	3	2,8
10	3,4	3,3	2,7	2,1	2,8	2,8	3,7	3,8	3,1	3,3	3,7	3,6
11	4,5	4,1	3,35	2,65	2,9	3,2	4,1	4,25	3,85	4	4,65	4,4
12	5,6	4,9	4	3,2	3	3,6	4,5	4,7	4,6	4,7	5,6	5,2
13	6,2	5,65	4,4	4,05	3,55	3,75	4,6	5,2	5,2	5,15	6,2	5,8
14	6,8	6,4	4,8	4,9	4,1	3,9	4,7	5,7	5,8	5,6	6,8	6,4
15	7,25	7	5,25	5,15	4,2	4,15	5,05	5,8	6,05	5,7	7,2	6,65
16	7,7	7,6	5,7	5,4	4,3	4,4	5,4	5,9	6,3	5,8	7,6	6,9
17	7,6	7,65	5,6	5,2	4,1	4	5	5,85	6,05	5,75	7,6	6,8
18	7,5	7,7	5,5	5	3,9	3,6	4,6	5,8	5,8	5,7	7,6	6,7
19	6,85	7,15	4,9	4,4	3,4	3,2	4,05	4,95	5,1	4,85	6,95	6,2
20	6,2	6,6	4,3	3,8	2,9	2,8	3,5	4,1	4,4	4	6,3	5,7
21	5,1	5,7	3,7	3,2	2,7	2,75	3,45	4	4	3,4	5,6	4,75
22	4	4,8	3,1	2,6	2,5	2,7	3,4	3,9	3,6	2,8	4,9	3,8

9.5 Dirección del viento

Para considerar como varia la dirección del viento mensualmente en la ciudad de concepción se recurrió a la página <https://es.windfinder.com/windstatistics/concepcion>, esta cuenta con una base de datos estadística basada en mediciones en la estación meteorológica Carriel Sur.

Se analizaron cartas de distribución del viento para cada mes del año y se tabularon los porcentajes correspondientes a cada dirección.

Distribución de la dirección del viento en (%)
julio

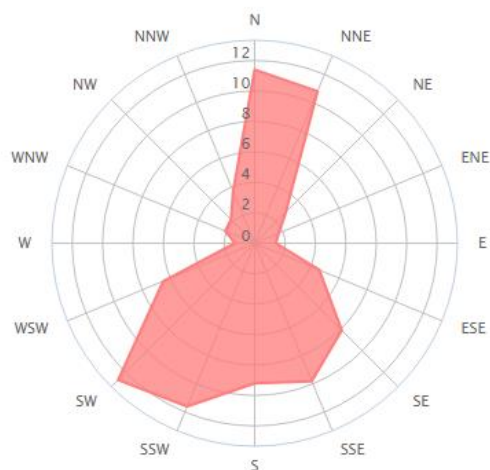


Figura 25: Distribución de la dirección del viento para el mes de julio, se observa que la dirección predominante corresponde a la suroeste. Rescatado de <https://es.windfinder.com/windstatistics/concepcion>.

Tabla 33: Distribución mensual de la dirección del viento para la ciudad de concepción. Elaboración propia.

Mes	Distribución de la dirección del viento [%]			
	N	E	S	W
Enero	18,4	2,3	33,95	45,2
Febrero	20,6	3,1	34,1	42,35
Marzo	17,5	5,45	37,45	39,6
Abril	19,15	8,5	41,85	30,5
Mayo	27,55	13,75	40,05	18,65
Junio	32,3	15,75	37,45	14,5
Julio	28,45	13,2	41	17,35
Agosto	29,95	12,3	34,4	23,35
Septiembre	20,7	8,35	37,55	33,5
Octubre	16,25	5,65	35,55	42,55
Noviembre	14	4,15	33,65	48,2
Diciembre	18,3	2,5	32,35	46,85

10. Anexo 2: Calculo de cargas térmicas

10.1 Carga sensible por radiación solar a través del cristal “ Q_s ”

La radiación solar que incide sobre los edificios genera importantes ganancias de calor. Si estas ocurren a través de superficies traslucidas (ventanas) se denominan ganancias solares directas. Cuando esta incide sobre superficies opacas (muros y cubiertas) se denominan indirectas.

10.1.1 Ganancias solares directas

La radiación solar que atraviesa las superficies traslucidas y transparentes incide sobre las superficies interiores del local calentándolas, lo que a su vez incrementa la temperatura del ambiente interior. Su cálculo es complejo debido a que depende de la posición solar respecto a la orientación de las ventanas en la edificación, esta varía a lo largo del día y es distinta para todos los días del año.

Una forma de calcularlas es mediante la expresión:

$$Q_{s,directa} = A_v \cdot G \cdot \theta \quad (15)$$

Donde:

A_v , corresponde al área de las ventanas en una orientación específica.

G , es la radiación solar incidente que atraviesa la superficie, en W/m^2 , correspondiente a la orientación, mes y latitud de la superficie considerada.

θ , es el coeficiente de ganancia solar (SHGC).

Las superficies de ventanas en cada orientación consideradas para ambos edificios están dadas por las tablas siguientes.

Tabla 34: Superficie de ventanas según orientación para el edificio de salas. Fuente Muñoz (2017).

Edificio Salas						
	U [W /m ² K]	Sup. Total [m ²]	Norte[m2]	Este[m2]	Oeste[m2]	sur [m ²]
Ventana	5,8	485,91	155,49	0	110,35	147,91

Tabla 35: Superficie de ventanas según orientación para el edificio de profesores. Fuente Muñoz (2017).

Edificio Profesores						
	U [W /m ² K]	Sup. Total [m ²]	Norte[m2]	Este[m2]	Oeste[m2]	Sur [m ²]
Ventana	5,8	115,57	28,02	82,87	0	4,68

La radiación solar incidente promedio horaria mensual según cada superficie se encuentra detallada en el Anexo 1.

Los coeficientes de ganancia solar (SHGC) corresponden a la fracción de la radiación solar incidente, como ganancia de calor, en un edificio a través de una ventana. Muñoz (2017) basado en la web (www.efficientwindows.org/glazing_double.html) determina un valor de 0,73 correspondiente a una ventana con vidrio simple bronce/gris.

En base a todos estos datos se determinó la ganancia solar directa total de ambos edificios para el horario de funcionamiento, sumando las ganancias individuales para cada orientación del edificio. Para el edificio de salas se consideraron las superficies exteriores de orientación norte, oeste y sur, mientras que para el edificio de profesores se consideraron las superficies exteriores de orientación norte, este y sur.

Tabla 36: Ganancia solar directa para el edificio de salas. Elaboración propia.

Ganancia solar directa en el edificio salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	29,006	17,328	8,605	3,061	0,000	0,000	0,000	0,529	10,239	17,229	28,527	32,846
8	41,961	26,838	29,925	27,026	17,769	11,986	12,969	20,752	31,364	35,356	34,857	37,069
9	54,513	46,237	51,924	49,100	38,255	33,307	31,868	39,385	52,417	54,215	50,650	42,557
10	67,855	61,963	69,804	68,342	53,563	50,128	50,693	55,110	69,729	66,426	66,449	58,355
11	76,811	77,536	83,793	80,287	67,136	62,208	62,525	66,751	81,751	77,613	77,486	69,581
12	81,037	85,587	91,580	85,807	72,921	69,256	65,811	74,273	85,793	84,531	83,798	76,610
13	83,838	93,767	100,130	95,365	73,308	73,160	69,844	78,948	92,912	93,788	92,929	86,548
14	88,696	104,745	109,164	99,972	73,495	74,367	71,415	80,440	97,746	97,091	98,259	92,283
15	86,213	105,504	109,165	95,759	62,654	75,759	71,224	80,199	95,981	95,324	96,246	91,623
16	82,126	95,665	98,897	81,156	38,476	58,865	53,697	64,998	81,067	80,917	84,210	82,845
17	78,995	76,540	73,797	51,391	13,245	1,812	22,163	39,736	51,442	56,400	72,726	83,209
18	68,334	56,436	36,313	1,604	0,000	0,000	0,000	0,000	10,201	35,348	57,505	71,583
19	42,265	19,516	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,180	41,359
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 37: Ganancia solar directa para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Ganancia solar directa en el edificio profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	2,345	1,869	1,291	0,310	0,000	0,000	0,000	0,037	1,121	1,788	2,480	2,869
8	3,123	2,787	2,577	1,850	1,057	0,698	0,809	1,352	2,154	2,579	2,998	2,829

9	3,315	3,132	3,086	2,422	1,669	1,454	1,425	1,832	2,626	2,839	3,016	2,653
10	3,149	3,008	3,035	2,575	1,808	1,682	1,765	2,000	2,644	2,608	2,833	2,243
11	2,682	2,719	2,680	2,261	1,755	1,609	1,681	1,841	2,317	2,210	2,361	1,643
12	1,971	2,067	2,015	1,700	1,377	1,328	1,308	1,498	1,688	1,622	1,671	1,460
13	1,452	1,572	1,596	1,470	1,130	1,125	1,105	1,255	1,460	1,481	1,486	1,390
14	1,296	1,496	1,501	1,352	1,002	1,022	1,007	1,142	1,346	1,337	1,350	1,224
15	1,041	1,294	1,297	1,133	0,728	0,898	0,884	1,002	1,158	1,141	1,121	0,986
16	0,810	0,998	0,985	0,818	0,338	0,593	0,572	0,701	0,836	0,821	0,817	0,676
17	0,612	0,639	0,595	0,414	0,063	0,038	0,197	0,345	0,428	0,454	0,560	0,469
18	0,383	0,341	0,196	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,057	0,180	0,314	0,249
19	0,160	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,046	0,073
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

10.1.2 Ganancias solares indirectas

Las ganancias solares indirectas implican un proceso en el que la radiación solar incidente primero aumenta la temperatura de la superficie exterior de los cerramientos, para después generar un flujo de calor por conducción a través de estos. Para calcular las ganancias solares indirectas independientemente de la temperatura exterior, se recurre a la siguiente ecuación: (Muñoz, 2017)

$$Q_{s,indirecta} = U \cdot A_0 \cdot G \cdot \alpha \cdot R_{so} \quad (16)$$

Donde:

U , es la transmitancia térmica del elemento

G , es la radiación solar incidente (W/m^2)

A_0 , es el área del cerramiento opaco (m^2)

α , es la absorbanza de la superficie (0-1)

R_{so} , es la resistencia de la película exterior de aire

Muñoz (2017) determina los valores de transmitancia térmica y absorbanza de los cerramientos del edificio, mientras que el valor de la resistencia de la película exterior de aire está dado por la norma NCh. 853 y corresponde a $0,055 [m^2 \cdot K/W]$.

Tabla 38: Superficie y características de los cerramientos opacos para el edificio de salas. Fuente Muñoz (2017)

Edificio de Salas							
	U [W /m ² K]	Sup. Total [m ²]	Norte[m2]	Este[m2]	Oeste[m2]	sur [m ²]	Absorbancia sup.
Muro	3,225	739,81	268,4	0	221,57	249,84	0,5
Techo simple	0,634	189,656					0,55
Techo aislado	0,272	900,211					0,55

Tabla 39: Superficie y características de los cerramientos opacos para el edificio de profesores. Fuente Muñoz (2017)

Edificio de Profesores							
	U [W /m ² K]	Sup. Total [m ²]	Norte[m2]	Este[m2]	Oeste[m2]	Sur [m ²]	Absorbancia sup.
Muro	3,225	416,74	102,55	237,95	0	76,24	0,5
Techo simple	0,634	0					0,55
Techo aislado	0,272	266,367					0,55

Finalmente considerando los valores determinados por Muñoz (2017) y los valores de radiación solar global incidente según orientación e inclinación utilizados para el cálculo de las ganancias solares directas se determinó la ganancia solar indirecta total de ambos edificios para el horario de funcionamiento, sumando las ganancias solares indirectas individuales para cada orientación del edificio. Para el edificio de salas se consideraron las superficies exteriores de orientación norte, oeste, sur y horizontal (para las cubiertas), mientras que para el edificio de profesores se consideraron las superficies exteriores de orientación norte, este, sur y horizontal (para las cubiertas).

Tabla 40: Ganancias solares indirectas para el edificio de salas. Elaboración propia.

Ganancia solar indirecta en el edificio de salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	8,504	5,155	2,554	0,788	0,000	0,000	0,000	0,135	2,851	4,736	8,958	9,855
8	13,397	9,235	8,926	7,174	4,395	2,852	3,116	5,337	8,925	9,364	12,412	12,789
9	17,987	15,279	15,492	13,427	9,921	8,368	8,115	10,543	15,074	16,959	17,389	15,581
10	22,425	20,095	20,844	18,955	14,180	12,970	13,228	14,995	20,175	20,682	22,286	20,632
11	25,603	24,904	25,053	22,426	17,957	16,279	16,543	18,330	23,768	24,055	25,732	24,099
12	27,279	27,382	27,372	24,041	19,581	18,243	17,529	20,473	24,948	26,211	27,763	26,384
13	28,362	29,592	29,536	26,429	19,845	19,153	18,513	21,589	26,599	28,341	29,834	28,802
14	29,364	32,006	31,409	27,206	19,604	19,206	18,654	21,669	27,435	28,641	30,595	29,754
15	28,145	31,458	30,723	25,538	16,843	19,144	18,261	21,199	26,391	27,538	29,329	28,868

10.2 Carga sensible por transmisión y radiación a través de paredes y techos exteriores “ Q_{str} ”

Esta se calcula por medio de la ecuación:

$$Q_{str} = U \cdot S \cdot (T_{ec} - T_i) \quad (17)$$

Dónde:

U es el coeficiente global de transmitancia térmica del cerramiento, también llamado transmitancia térmica, en $[W/m^2 \cdot K]$

S es la superficie del muro o techo expuesta a la diferencia de temperaturas, en $[m^2]$.

T_i es la temperatura interior de diseño del local $[^\circ C]$.

T_{ec} es la temperatura exterior de cálculo $[^\circ C]$.

La temperatura exterior de cálculo se multiplicará según la orientación del cerramiento por un factor según la orientación, ya que la temperatura exterior de un muro es distinta para una orientación norte o una sur por efectos de las sombras.

Tabla 42: Factores para la temperatura exterior según orientación. Fuente <http://ingemecanica.com>

Orientación	Factores
Norte	1
Sur	0,6
Este	0,8
Oeste	0,9
Cubierta	1

Se calculo la carga por transmisión para cada orientación del edificio, luego estas se sumaron para obtener la carga total del edificio. Para el edificio de salas fueron las orientaciones norte, oeste, sur y horizontal para los techos. Para el edificio de salsas fueron las orientaciones norte, este, sur y horizontal para los techos.

10.2.1 Coeficientes de transmitancia térmica

A continuación, se presentan las características de cada uno de los elementos constructivos de la envolvente térmica del edificio.

Los muros exteriores del edificio son de hormigón armado estucado, Muñoz (2017) determina una transmitancia térmica del elemento de $3,22 [W/m^2 \cdot K]$. La tabla siguiente resume los valores considerados para este cálculo según la norma NCh. 853.

Tabla 43: Valores considerados para determinar la transmitancia térmica de los muros del edificio San Agustín (Basado en Muñoz,2017)

Material	e [m]	Densidad [kg/m ³]	λ [W/m K]
Motero de estuco	0,025	2000	1,4
Hormigón armado	0,2	2400	1,63
Rsi + Rse			0,17
Transmitancia térmica total elemento, U [W/m² K]			3,225

El techo del edificio San Agustín posee 2 tipos de techo de los que no se tienen detalles, Muñoz (2017) los describe de la siguiente manera:

El techo tipo 1 posee un conjunto de cerchas y aislación de tipo lana mineral (Ilustración Xa). Muñoz (2017) determina una transmitancia térmica de $0,272 [W/m^2 \cdot K]$. La tabla siguiente resume los valores considerados para este cálculo según la norma NCh. 853.

Tabla 44: Valores considerados para determinar la transmitancia térmica del techo tipo 1 del edificio San Agustín (Basado en Muñoz, 2017)

Material	e [m]	Densidad [kg/m ³]	λ [W/m K]
Terciado ranurado	0,007	1030	0,28
Pino insigne	0,125	-	0,104
Lana mineral	0,15	50	0,041
Rsi + Rse			0,2
Transmitancia térmica total elemento, U [W/m² K]			0,272

El techo tipo 2 posee un conjunto de vigas a la vista, con una plancha de terminación en el cielo. Muñoz (2017) determina una transmitancia térmica de $0,634 [W/m^2 \cdot K]$. La tabla siguiente resume los valores considerados para este cálculo según la norma NCh. 853.

Tabla 45: Valores considerados para determinar la transmitancia térmica del techo tipo 2 del edificio San Agustín (Basado en Muñoz,2017)

Material	e [m]	Densidad [kg/m ³]	λ [W/m K]
Placa aglomerada	0,018	600	0,103
Pino insigne	0,125	-	0,104
Rsi + Rse			0,2
Transmitancia térmica total elemento, U [W/m² K]			0,634

Para las ventanas, estas corresponden a un vidrio simple con un marco de aluminio, el manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos considera una transmitancia térmica de 5,8 [$W/m^2 K$] para vidrios simples de 4mm.

Tabla 46: Valores U típicos para diferentes tipos de vidrios (Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos, p50)

Grupo	Tipo	Vidrio (mm)	Cámara Aire (mm)	Transmitancia (W/m^2K)
Simple	Claro	3	-	5.85
		4	-	5.8
Doble	Claro-Claro	4	6	3.3
		4	12	2.9
		4	18	2.7
		6	6	3.4
Doble reflectante	Claro	6	12	1.8
	Plata	6	12	1.8
	Verde	6	12	1.8
	Gris	6	12	1.8
Doble Baja emisividad	Claro	4	6	2.5
		6	6	2.4

10.2.2 Cargas por transmisión y radiación a través de la envolvente.

Considerando estos valores de transmitancia térmica según las superficies detalladas en la tablas 37 y 38, las temperaturas exteriores detalladas en el anexo 1, los valores de carga térmica por transmisión y radiación a través de paredes y techos calculados se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 47: Cargas por transmisión para el edificio de profesores (Elaboración propia)

Carga térmica por transmisión en el edificio de profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-19,877	-21,604	-23,419	-24,974	-26,011	-28,084	-29,294	-28,171	-28,516	-26,356	-23,419	-20,309
8	-18,062	-20,654	-23,419	-25,147	-26,184	-28,084	-29,467	-28,257	-28,603	-25,320	-21,691	-18,235
9	-14,002	-16,594	-19,531	-22,814	-24,974	-27,047	-28,516	-27,047	-26,270	-22,296	-18,581	-15,211
10	-9,941	-12,533	-15,643	-20,481	-23,764	-26,011	-27,566	-25,838	-23,937	-19,272	-15,470	-12,187
11	-7,781	-9,941	-12,187	-17,630	-21,432	-24,542	-25,924	-23,505	-21,691	-17,544	-14,002	-10,287
12	-5,621	-7,349	-8,731	-14,779	-19,099	-23,073	-24,283	-21,173	-19,445	-15,816	-12,533	-8,386
13	-4,584	-5,880	-7,349	-13,483	-17,976	-21,691	-22,987	-20,222	-18,581	-14,866	-11,583	-7,435
14	-3,548	-4,412	-5,967	-12,187	-16,853	-20,309	-21,691	-19,272	-17,717	-13,915	-10,632	-6,485
15	-3,375	-3,893	-5,880	-12,187	-16,766	-19,877	-21,086	-19,013	-17,630	-13,742	-10,632	-6,399

16	-3,202	-3,375	-5,794	-12,187	-16,680	-19,445	-20,481	-18,753	-17,544	-13,570	-10,632	-6,312
17	-4,239	-4,239	-7,176	-13,310	-17,976	-20,481	-21,259	-19,531	-18,149	-14,347	-11,496	-7,349
18	-5,276	-5,103	-8,559	-14,434	-19,272	-21,518	-22,036	-20,309	-18,753	-15,125	-12,360	-8,386
19	-7,435	-7,522	-11,064	-16,334	-20,568	-23,073	-23,505	-21,777	-20,309	-17,025	-14,261	-9,941
20	-9,595	-9,941	-13,570	-18,235	-21,864	-24,628	-24,974	-23,246	-21,864	-18,926	-16,162	-11,496
21	-12,014	-12,187	-14,866	-19,445	-22,641	-25,233	-25,752	-24,110	-22,900	-20,309	-17,630	-13,483
22	-14,434	-14,434	-16,162	-20,654	-23,419	-25,838	-26,529	-24,974	-23,937	-21,691	-19,099	-15,470

Tabla 48: Cargas por transmisión para el edificio de salas (Elaboración propia).

Carga térmica por transmisión en el edificio de salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-47,989	-52,339	-56,907	-60,821	-63,431	-68,651	-71,696	-68,869	-69,739	-64,301	-56,907	-49,077
8	-43,422	-49,947	-56,907	-61,256	-63,866	-68,651	-72,131	-69,086	-69,956	-61,691	-52,557	-43,857
9	-33,200	-39,725	-47,119	-55,384	-60,821	-66,041	-69,739	-66,041	-64,084	-54,079	-44,727	-36,245
10	-22,978	-29,503	-37,332	-49,512	-57,776	-63,431	-67,346	-62,996	-58,211	-46,467	-36,897	-28,633
11	-17,541	-22,978	-28,633	-42,335	-51,904	-59,734	-63,214	-57,124	-52,557	-42,117	-33,200	-23,848
12	-12,103	-16,453	-19,933	-35,157	-46,032	-56,037	-59,081	-51,252	-46,902	-37,767	-29,503	-19,063
13	-9,493	-12,756	-16,453	-31,895	-43,205	-52,557	-55,819	-48,859	-44,727	-35,375	-27,110	-16,671
14	-6,883	-9,058	-12,973	-28,633	-40,377	-49,077	-52,557	-46,467	-42,552	-32,982	-24,718	-14,278
15	-6,448	-7,753	-12,756	-28,633	-40,160	-47,989	-51,034	-45,814	-42,335	-32,547	-24,718	-14,061
16	-6,013	-6,448	-12,538	-28,633	-39,942	-46,902	-49,512	-45,162	-42,117	-32,112	-24,718	-13,843
17	-8,623	-8,623	-16,018	-31,460	-43,205	-49,512	-51,469	-47,119	-43,640	-34,070	-26,893	-16,453
18	-11,233	-10,798	-19,498	-34,287	-46,467	-52,122	-53,427	-49,077	-45,162	-36,027	-29,068	-19,063
19	-16,671	-16,888	-25,805	-39,072	-49,729	-56,037	-57,124	-52,774	-49,077	-40,812	-33,852	-22,978
20	-22,108	-22,978	-32,112	-43,857	-52,992	-59,951	-60,821	-56,472	-52,992	-45,597	-38,637	-26,893
21	-28,198	-28,633	-35,375	-46,902	-54,949	-61,474	-62,779	-58,646	-55,602	-49,077	-42,335	-31,895
22	-34,287	-34,287	-38,637	-49,947	-56,907	-62,996	-64,736	-60,821	-58,211	-52,557	-46,032	-36,897

10.3 Carga sensible transmitida por infiltraciones de aire exterior “ Q_{si} ”

Las cargas transmitidas por infiltraciones y ventilación de aire exterior se determinan mediante la expresión:

$$Q_{si} = Q \cdot \rho \cdot C_{e,aire} \cdot (T_{ec} - T_i) \quad (18)$$

Donde:

Q es el caudal de aire infiltrado y de ventilación, en $[m^3/s]$.

ρ es la densidad del aire, de valor $1,18 [kg/m^3]$.

$C_{e,aire}$ es el calor específico del aire, de valor $1012 [J/kg \text{ } ^\circ C]$.

T_i es la temperatura interior de diseño del local $[^\circ C]$.

T_{ec} es la temperatura exterior de cálculo $[^\circ C]$.

10.3.1 Carga sensible por ventilación

El Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios en Chile (RITCH) recomienda para mantener calidades aceptables de aire en locales ocupados los criterios de ventilación indicados en la norma española UNE 10011 la que fue sustituida en 2005 por la UNE-EN 13779. Esta norma clasifica el aire interior de la zona ocupada en 4 grupos básicos y recomienda caudales de aire por persona. Estos valores fueron actualizados en el 2013 por el Reglamento de instalaciones térmicas en edificios español del 2013 (RITE). La siguiente tabla resume los valores del RITE.

Tabla 49: Tasas de aire exterior por persona según calidad del aire según el RITE 2013.

Categoría	Calidad de aire interior	Tasa de aire exterior por persona Valor por defecto $[dm^3/s]$
IDA 1	Optima	20
IDA 2	Buena	12,5
IDA 3	Media	8
IDA 4	Baja	5

Para aulas de enseñanza, oficinas, locales comunes de estudiantes se recomienda un aire de categoría interior IDA 2 sin embargo consideraremos una calidad de aire optima IDA 1.

Estimar el número de personas que se consideran para el cálculo es complejo debido a que el número varía constantemente en ambos edificios y no todas las salas del recinto se utilizan simultáneamente. Se considerarán 2 tipos de ocupaciones según el horario.

De 8:00 a 19:00 al igual que Muñoz (2017) para el edificio de salas se considerará que en cada hora están ocupadas un 70% del total de las salas, pero en cada sala ocupada solo habrá un 60% de la ocupación total de esa sala. Para el edificio de profesores se considerará que están ocupadas un 60% del total de oficinas.

De 19:00 a 22:00 para el edificio de salas se considerará que en cada hora están ocupadas un 30% del total de salas, pero en cada sala ocupada solo habrá un 60% de la ocupación total de esa sala. Para el edificio de profesores se considerará que están ocupadas un 30% del total de oficinas.

Tabla 50: Número de ocupantes del edificio de salas según el horario. Elaboración propia basado en Muñoz (2017).

Piso	Capacidad total por piso	Horario de 8:00 a 19:00		Horario de 19:00 a 22:00	
		N° de personas a un 70% de la capacidad total	N° de personas con un 60% de ocupación dentro de la sala	N° de personas a un 30% de la capacidad total	N° de personas con un 60% de ocupación dentro de la sala
1	300	210	126	90	54
2	240	168	100,8	72	43,2
3	140	98	58,8	42	25,2
Total edificio:	680	476	285,6	204	122,4

Tabla 51: Número de ocupantes del edificio de profesores según el horario. Elaboración propia basado en Muñoz (2017).

Piso	Capacidad total por piso	Horario de 8:00 a 19:00	Horario de 19:00 a 22:00
		N° de personas a un 60% de la capacidad total	N° de personas a un 30% de la capacidad total
1	24	15	8
2	17	10	6
3	21	13	7
4	20	12	6
Total edificio:	82	50	27

De esta manera para el edificio de salas el número de ocupantes de 8:00 a 19:00 es de 286 personas, y de 19:00 a 22:00 es de 123 personas. Para el edificio de profesores la ocupación de 8:00 a 19:00 será de 50 personas y de 19:00 a 22:00 de 27 personas.

Finalmente, el caudal mínimo requerido de ventilación de aire exterior lo podemos obtener mediante la expresión:

$$Q_{\text{ventilacion}} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ Personas en el local} \cdot \text{Tasa de aire exterior por persona}}{1000} \quad (19)$$

Así los caudales mínimos de aire para ventilación serían:

Tabla 52: Caudales de ventilación para ambos edificios según horario de funcionamiento. Elaboración propia.

Edificio	Horario de 8:00 a 19:00		Horario de 19:00 a 22:00	
	Ocupantes	Caudal de aire para ventilación [m ³ /s]	Ocupantes	Caudal de aire para ventilación [m ³ /s]
Salas	285,6	5,712	123	2,46
Profesores	50	1	27	0,54

Finalmente, la carga transmitida por ventilación en ambos edificios, considerando los valores de temperatura presentados en el anexo 1 serían:

Tabla 53: Cargase térmica sensible transmitida por ventilación en el edificio de salas. Elaboración propia.

Hora	Carga térmica sensible por ventilación en el edificio de salas [kW]											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-50,205	-57,035	-64,208	-70,355	-74,453	-82,650	-87,432	-82,992	-84,358	-75,820	-64,208	-51,913
8	-43,033	-53,279	-64,208	-71,038	-75,137	-82,650	-88,115	-83,333	-84,699	-71,721	-57,377	-43,716
9	-26,981	-37,227	-48,839	-61,817	-70,355	-78,552	-84,358	-78,552	-75,478	-59,768	-45,082	-31,762
10	-10,929	-21,175	-33,470	-52,596	-65,574	-74,453	-80,601	-73,770	-66,257	-47,814	-32,787	-19,809
11	-2,391	-10,929	-19,809	-41,325	-56,352	-68,647	-74,112	-64,549	-57,377	-40,984	-26,981	-12,295
12	6,148	-0,683	-6,148	-30,055	-47,131	-62,841	-67,623	-55,328	-48,497	-34,153	-21,175	-4,781
13	10,246	5,123	-0,683	-24,932	-42,691	-57,377	-62,500	-51,571	-45,082	-30,396	-17,418	-1,025
14	14,344	10,929	4,781	-19,809	-38,251	-51,913	-57,377	-47,814	-41,667	-26,639	-13,661	2,732
15	15,027	12,978	5,123	-19,809	-37,910	-50,205	-54,986	-46,790	-41,325	-25,956	-13,661	3,074
16	15,710	15,027	5,464	-19,809	-37,568	-48,497	-52,596	-45,765	-40,984	-25,273	-13,661	3,415
17	11,612	11,612	0,000	-24,249	-42,691	-52,596	-55,669	-48,839	-43,374	-28,347	-17,076	-0,683
18	7,514	8,197	-5,464	-28,688	-47,814	-56,694	-58,743	-51,913	-45,765	-31,421	-20,492	-4,781
19	-0,441	-0,588	-6,610	-15,569	-22,767	-27,026	-27,761	-24,823	-22,326	-16,745	-12,044	-4,700
20	-4,113	-4,700	-10,869	-18,801	-24,970	-29,670	-30,258	-27,320	-24,970	-19,976	-15,276	-7,344
21	-8,225	-8,519	-13,072	-20,857	-26,292	-30,698	-31,580	-28,789	-26,732	-22,326	-17,773	-10,722
22	-12,338	-12,338	-15,276	-22,914	-27,614	-31,726	-32,901	-30,258	-28,495	-24,676	-20,270	-14,101

Tabla 54: Carga térmica sensible transmitida por ventilación en el edificio de profesores. Elaboración propia.

Carga térmica sensible por ventilación en el edificio de profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-8,777	-9,971	-11,225	-12,300	-13,016	-14,449	-15,285	-14,509	-14,748	-13,255	-11,225	-9,076
8	-7,523	-9,314	-11,225	-12,419	-13,136	-14,449	-15,405	-14,569	-14,808	-12,539	-10,031	-7,643
9	-4,717	-6,508	-8,538	-10,807	-12,300	-13,733	-14,748	-13,733	-13,195	-10,449	-7,881	-5,553
10	-1,911	-3,702	-5,851	-9,195	-11,464	-13,016	-14,091	-12,897	-11,583	-8,359	-5,732	-3,463
11	-0,418	-1,911	-3,463	-7,225	-9,852	-12,001	-12,957	-11,285	-10,031	-7,165	-4,717	-2,149
12	1,075	-0,119	-1,075	-5,254	-8,240	-10,986	-11,822	-9,673	-8,479	-5,971	-3,702	-0,836
13	1,791	0,896	-0,119	-4,359	-7,464	-10,031	-10,927	-9,016	-7,881	-5,314	-3,045	-0,179
14	2,508	1,911	0,836	-3,463	-6,687	-9,076	-10,031	-8,359	-7,284	-4,657	-2,388	0,478
15	2,627	2,269	0,896	-3,463	-6,628	-8,777	-9,613	-8,180	-7,225	-4,538	-2,388	0,537
16	2,747	2,627	0,955	-3,463	-6,568	-8,479	-9,195	-8,001	-7,165	-4,418	-2,388	0,597
17	2,030	2,030	0,000	-4,239	-7,464	-9,195	-9,732	-8,538	-7,583	-4,956	-2,985	-0,119
18	1,314	1,433	-0,955	-5,015	-8,359	-9,912	-10,270	-9,076	-8,001	-5,493	-3,582	-0,836
19	-0,090	-0,119	-1,343	-3,165	-4,627	-5,493	-5,642	-5,045	-4,538	-3,403	-2,448	-0,955
20	-0,836	-0,955	-2,209	-3,821	-5,075	-6,031	-6,150	-5,553	-5,075	-4,060	-3,105	-1,493
21	-1,672	-1,732	-2,657	-4,239	-5,344	-6,239	-6,419	-5,851	-5,433	-4,538	-3,612	-2,179
22	-2,508	-2,508	-3,105	-4,657	-5,613	-6,448	-6,687	-6,150	-5,792	-5,015	-4,120	-2,866

10.3.2 Carga sensible por infiltración

Para determinar el caudal por infiltración se considerará el área de infiltración determinadas por Muñoz (2017) para las ventanas y las puertas principales del edificio en el primer piso. Esta puerta de 2 hojas se abre constantemente con el tránsito de alumnos y no tiene sistema de cierre automático por lo que se considerará que 1 hoja estará permanentemente abierta.

Tabla 55: Área de infiltración en cada piso y orientación del edificio San Agustín. Basado en Muñoz (2017).

Piso	Área infiltración Salas [m ²]				Área infiltración Profesores [m ²]			
	Sur	Oeste	Norte	Este	Sur	Oeste	Norte	Este
1	2,2505	0,101	0,108	0	0	0	0,036	0,119
2	0,058	0,103	0,191	0	0	0	0,072	0,119
3	0,094	0,069	0,036	0	0	0	0,036	0,119
4	-	-	-	-	0	0	0,036	0,119

Total cara	2,4025	0,273	0,335	0	0	0	0,18	0,476
-------------------	--------	-------	-------	---	---	---	------	-------

Debido a que durante cada mes la dirección del viento es variable se considerara que, para cada cara del edificio, el total del viento que incide en un mes se multiplicara por el porcentaje de la distribución del viento que corresponde a aquella cara. De esta manera cada cara del edificio tendrá su componente de viento incidente mensual. La distribución de la dirección del viento proviene de la página www.es.windfinder.com para la ciudad de Concepción. Por ejemplo, para el mes de enero 45,2% del periodo el viento incide desde el oeste.

Tabla 56: Distribución mensual de la dirección del viento en la ciudad de Concepción. Fuente <https://windfinder.com>

Mes	Velocidad media [m/s]	Distribución mensual de la dirección del viento [%]			
		N	E	S	W
Enero	2,74	18,4	2,3	33,95	45,2
Febrero	2,28	20,6	3,1	34,1	42,35
Marzo	1,78	17,5	5,45	37,45	39,6
Abril	1,93	19,15	8,5	41,85	30,5
Mayo	1,79	27,55	13,75	40,05	18,65
Junio	2,52	32,3	15,75	37,45	14,5
Julio	2,64	28,45	13,2	41	17,35
Agosto	2,56	29,95	12,3	34,4	23,35
Septiembre	1,91	20,7	8,35	37,55	33,5
Octubre	2,06	16,25	5,65	35,55	42,55
Noviembre	2,88	14	4,15	33,65	48,2
Diciembre	2,97	18,3	2,5	32,35	46,85

El caudal de infiltración total corresponderá a la suma de los caudales por cada cara del edificio, mediante la expresión:

$$Q_{infiltracion} = \sum A_{infiltracion,cara} \cdot V_{media,cara} \cdot \frac{\%direccion\ del\ viento,cara}{100} \quad (20)$$

La siguiente tabla resume los cálculos y valores obtenidos para los caudales mensuales.

Tabla 57: Caudales de infiltración totales para el edificio de salas. Elaboración propia.

Caudales de infiltración totales en el edificio de salas [m³/s]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	3,000	5,402	5,919	4,608	5,117	5,198	6,254	6,265	6,392	5,292	4,448	5,846
8	3,353	3,720	2,673	2,723	5,017	5,671	6,971	6,529	5,342	4,014	4,012	3,389

9	4,677	4,783	3,914	3,561	5,318	5,482	7,279	6,618	5,629	5,018	5,233	4,744
10	6,000	5,845	5,155	4,399	5,619	5,293	7,586	6,706	5,915	6,022	6,454	6,100
11	7,941	7,262	6,396	5,551	5,820	6,049	8,407	7,500	7,346	7,299	8,111	7,456
12	9,882	8,679	7,637	6,703	6,020	6,805	9,227	8,294	8,777	8,576	9,768	8,811
13	10,941	10,008	8,401	8,484	7,124	7,089	9,432	9,176	9,922	9,397	10,814	9,828
14	12,000	11,336	9,165	10,264	8,228	7,372	9,637	10,059	11,066	10,219	11,861	10,844
15	12,794	12,399	10,024	10,788	8,428	7,845	10,355	10,235	11,543	10,401	12,558	11,268
16	13,588	13,462	10,883	11,311	8,629	8,317	11,072	10,412	12,020	10,583	13,256	11,692
17	13,412	13,550	10,692	10,892	8,228	7,561	10,252	10,324	11,543	10,492	13,256	11,522
18	13,235	13,639	10,501	10,473	7,826	6,805	9,432	10,235	11,066	10,401	13,256	11,353
19	12,088	12,665	9,355	9,217	6,823	6,049	8,304	8,735	9,731	8,850	12,122	10,506
20	10,941	11,691	8,210	7,960	5,820	5,293	7,176	7,235	8,395	7,299	10,989	9,658
21	9,000	10,096	7,064	6,703	5,418	5,198	7,074	7,059	7,632	6,204	9,768	8,049
22	7,059	8,502	5,919	5,446	5,017	5,104	6,971	6,882	6,869	5,109	8,547	6,439

Tabla 58: Caudales de infiltración totales para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Caudales de infiltración totales en el edificio de profesores [m ³ /s]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	0,075	0,158	0,178	0,165	0,293	0,366	0,348	0,399	0,258	0,163	0,115	0,155
8	0,084	0,109	0,080	0,097	0,288	0,399	0,388	0,416	0,216	0,124	0,103	0,090
9	0,117	0,140	0,118	0,127	0,305	0,386	0,405	0,422	0,227	0,154	0,135	0,126
10	0,150	0,171	0,155	0,157	0,322	0,373	0,422	0,427	0,239	0,185	0,166	0,161
11	0,198	0,213	0,192	0,199	0,334	0,426	0,468	0,478	0,296	0,225	0,209	0,197
12	0,247	0,254	0,230	0,240	0,345	0,479	0,513	0,529	0,354	0,264	0,252	0,233
13	0,273	0,293	0,253	0,303	0,408	0,499	0,525	0,585	0,400	0,289	0,279	0,260
14	0,300	0,332	0,276	0,367	0,472	0,519	0,536	0,641	0,447	0,314	0,306	0,287
15	0,319	0,363	0,302	0,386	0,483	0,552	0,576	0,652	0,466	0,320	0,324	0,298
16	0,339	0,394	0,327	0,405	0,495	0,586	0,616	0,664	0,485	0,326	0,342	0,309
17	0,335	0,397	0,322	0,390	0,472	0,532	0,570	0,658	0,466	0,323	0,342	0,305
18	0,331	0,399	0,316	0,375	0,449	0,479	0,525	0,652	0,447	0,320	0,342	0,300
19	0,302	0,371	0,281	0,330	0,391	0,426	0,462	0,557	0,393	0,272	0,312	0,278
20	0,273	0,342	0,247	0,285	0,334	0,373	0,399	0,461	0,339	0,225	0,283	0,256
21	0,225	0,295	0,213	0,240	0,311	0,366	0,393	0,450	0,308	0,191	0,252	0,213

22	0,176	0,249	0,178	0,195	0,288	0,359	0,388	0,439	0,277	0,157	0,220	0,170
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Finalmente, la carga sensible por infiltración para cada hora del mes utilizando la ecuación 18, está dada en la siguiente tabla:

Tabla 59: Carga sensible por infiltración para el edificio de salas. Elaboración propia.

Carga térmica sensible por infiltración en el edificio de salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-26,332	-29,914	-33,676	-36,900	-39,050	-43,349	-45,856	-43,528	-44,244	-39,766	-33,676	-27,227
8	-22,570	-27,944	-33,676	-37,258	-39,408	-43,349	-46,215	-43,707	-44,423	-37,617	-30,093	-22,928
9	-14,151	-19,525	-25,615	-32,422	-36,900	-41,199	-44,244	-41,199	-39,587	-31,347	-23,645	-16,659
10	-5,732	-11,106	-17,554	-27,585	-34,392	-39,050	-42,274	-38,691	-34,751	-25,078	-17,196	-10,389
11	-1,254	-5,732	-10,389	-21,674	-29,556	-36,004	-38,870	-33,855	-30,093	-21,495	-14,151	-6,449
12	3,224	-0,358	-3,224	-15,763	-24,719	-32,959	-35,467	-29,018	-25,436	-17,913	-11,106	-2,508
13	5,374	2,687	-0,358	-13,076	-22,391	-30,093	-32,780	-27,048	-23,645	-15,942	-9,135	-0,537
14	7,523	5,732	2,508	-10,389	-20,062	-27,227	-30,093	-25,078	-21,853	-13,972	-7,165	1,433
15	7,882	6,807	2,687	-10,389	-19,883	-26,332	-28,839	-24,540	-21,674	-13,614	-7,165	1,612
16	8,240	7,882	2,866	-10,389	-19,704	-25,436	-27,585	-24,003	-21,495	-13,255	-7,165	1,791
17	6,090	6,090	0,000	-12,718	-22,391	-27,585	-29,198	-25,615	-22,749	-14,867	-8,956	-0,358
18	3,941	4,299	-2,866	-15,047	-25,078	-29,735	-30,810	-27,227	-24,003	-16,480	-10,748	-2,508
19	-0,537	-0,717	-8,061	-18,987	-27,765	-32,959	-33,855	-30,272	-27,227	-20,420	-14,688	-5,732
20	-5,016	-5,732	-13,255	-22,928	-30,451	-36,184	-36,900	-33,318	-30,451	-24,361	-18,629	-8,956
21	-10,031	-10,389	-15,942	-25,436	-32,064	-37,437	-38,512	-35,109	-32,601	-27,227	-21,674	-13,076
22	-15,047	-15,047	-18,629	-27,944	-33,676	-38,691	-40,124	-36,900	-34,751	-30,093	-24,719	-17,196

Tabla 60: Carga sensible por infiltración para el edificio de salas. Elaboración propia.

Carga térmica sensible por infiltración en el edificio de profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-0,658	-0,747	-0,841	-0,921	-0,975	-1,082	-1,145	-1,087	-1,105	-0,993	-0,841	-0,680
8	-0,564	-0,698	-0,841	-0,930	-0,984	-1,082	-1,154	-1,091	-1,109	-0,939	-0,751	-0,573
9	-0,353	-0,488	-0,640	-0,810	-0,921	-1,029	-1,105	-1,029	-0,989	-0,783	-0,590	-0,416
10	-0,143	-0,277	-0,438	-0,689	-0,859	-0,975	-1,056	-0,966	-0,868	-0,626	-0,429	-0,259
11	-0,031	-0,143	-0,259	-0,541	-0,738	-0,899	-0,971	-0,845	-0,751	-0,537	-0,353	-0,161

12	0,081	-0,009	-0,081	-0,394	-0,617	-0,823	-0,886	-0,725	-0,635	-0,447	-0,277	-0,063
13	0,134	0,067	-0,009	-0,327	-0,559	-0,751	-0,819	-0,675	-0,590	-0,398	-0,228	-0,013
14	0,188	0,143	0,063	-0,259	-0,501	-0,680	-0,751	-0,626	-0,546	-0,349	-0,179	0,036
15	0,197	0,170	0,067	-0,259	-0,497	-0,658	-0,720	-0,613	-0,541	-0,340	-0,179	0,040
16	0,206	0,197	0,072	-0,259	-0,492	-0,635	-0,689	-0,599	-0,537	-0,331	-0,179	0,045
17	0,152	0,152	0,000	-0,318	-0,559	-0,689	-0,729	-0,640	-0,568	-0,371	-0,224	-0,009
18	0,098	0,107	-0,072	-0,376	-0,626	-0,743	-0,769	-0,680	-0,599	-0,412	-0,268	-0,063
19	-0,013	-0,018	-0,201	-0,474	-0,693	-0,823	-0,845	-0,756	-0,680	-0,510	-0,367	-0,143
20	-0,125	-0,143	-0,331	-0,573	-0,760	-0,904	-0,921	-0,832	-0,760	-0,608	-0,465	-0,224
21	-0,250	-0,259	-0,398	-0,635	-0,801	-0,935	-0,962	-0,877	-0,814	-0,680	-0,541	-0,327
22	-0,376	-0,376	-0,465	-0,698	-0,841	-0,966	-1,002	-0,921	-0,868	-0,751	-0,617	-0,429

10.4 Carga sensible por aportaciones internas “ Q_{sai} ”

La ganancia de carga sensible debida a las aportaciones internas del local se determina a su vez como la suma de los siguientes tipos de cargas que se general dentro del mismo:

$$Q_{sai} = Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{se} \quad (21)$$

Donde:

Q_{sil} es el valor de la ganancia interna de carga sensible debida a la iluminación interior del local [W].

Q_{sp} es la ganancia interna de carga sensible debida a los ocupantes del local [W].

Q_{se} es la ganancia interna de carga sensible debida a los diversos aparatos existentes en el local, como aparatos eléctricos, ordenadores, etc. [W].

10.4.1 Carga sensible por iluminación “ Q_{sil} ”

Para el cálculo de la carga térmica sensible aportada por la iluminación del establecimiento se considerará el porcentaje de la potencia eléctrica de esta que se convierte en calor y no en luz. Las ampollitas incandescentes son ineficientes debido a que solo aprovechan un 10% de su potencia como luz mientras que un 90% se convierte en calor. Para las lamparas fluorescentes un 40% de su potencia se aprovecha como luz y un 60% se convierte en calor (TRNSYS).

Tabla 61: Valores de eficiente según tipo de iluminación. Fuente software TRNSYS.

Tipo	Eficiencia (%)	% que se convierte en calor
Ampolleta incandescente	10	90
Tubo fluorescente	40	60

En el caso de las lamparas de tipo fluorescente se multiplica la potencia total de todas las lamparas por 1,25 para considerar el consumo complementario de las reactancias.

De esta manera la cantidad de calor sensible que aporta cada tipo de lámpara estará dado por:

Para lamparas incandescentes:

$$Q_{sil,incandescente} = n \cdot Potencia_{Lampara\ incandescente} \cdot 0,9 \quad (22)$$

Para lamparas fluorescentes:

$$Q_{sil,fluorescente} = 1,25 \cdot n \cdot Potencia_{Lampara\ fluorescente} \cdot 0,6 \quad (23)$$

La ganancia de carga sensible por iluminación se obtendrá como la suma de las 2 ecuaciones anteriores:

$$Q_{sil} = Q_{sil,incandescente} + Q_{sil,fluorescente} \quad (24)$$

En el edificio se utilizan 3 tipos de iluminación: Ampolletas incandescentes de 400W y tubos fluorescentes Philips de 18 y 36 W. La potencia real de estos tubos es de 14,4 y 28,8 W según especificaciones del fabricante.

Las tablas siguientes resumen los cálculos y cargas sensibles por iluminación obtenidas para ambos edificios:

Tabla 62: Calculo de cargas sensibles por iluminación para el edificio de salas. Elaboración propia.

Piso	N° Ampolletas incandescentes de 400 W	N° tubos de 18 W	N° tubos de 36 W	Qsil incandescente [kW]	Qsil descarga [kW]	Qsil [kW]
1	8	0	114	2,88	2,462	5,342
2	0	0	138	0	2,981	2,981
3	2	24	90	0,72	2,203	2,923
					Total:	11,246

Tabla 63: Calculo de cargas sensibles por iluminación para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Piso	N° tubos de 36 W	Qsil descarga [kW]	Qsil [kW]
1	52	1,123	1,123
2	34	0,734	0,734
3	34	0,734	0,734
4	32	0,691	0,691
		Total:	3,283

Para ser coherentes con los porcentajes de ocupación considerados en ambos edificios, se considera que para el edificio de salas de 8:00 a 19:00 la carga sensible debida a iluminación será un 70% del total, mientras que de 19:00 a 22:00 será un 30% del total. Para el edificio de profesores de 8:00 a 19:00 la carga sensible debida a iluminación será un 60% del total, mientras que de 19:00 a 22:00 será un 30% del total.

Finalmente, la carga sensible debido a iluminación para ambos edificios será:

Tabla 64: Carga térmica sensible debido a iluminación para ambos edificios. Elaboración propia.

Edificio	Carga térmica sensible debido a iluminación [kW]	
	Horario de 8:00 a 19:00	Horario de 19:00 a 22:00
Salas	7,872	3,374
Profesores	1,970	0,985

10.4.2 Carga sensible por ocupantes “ Q_{sp} ”

La carga sensible por ocupación en el local utilizamos la expresión:

$$Q_{sp} = n \cdot C_{sensible, persona} \quad (25)$$

Donde:

n es el número de personas que se espera que ocupen el local.

$C_{sensible, persona}$ es el calor sensible por persona y actividad que realiza, estos valores los podemos obtener de la tabla siguiente, según la ISO 7730. En nuestro caso se escogieron los valores para una persona sentada haciendo un trabajo ligero como escribir.

Tabla 65: Valores de calor sensible y latente por persona según actividad. Fuente ISO 7730.

Actividad	Calor sensible [W]	Calor latente [W]
Sentado, trabajo ligero, escribiendo	75	75
De pie, trabajo ligero o lento	90	95

Las cargas sensibles por los ocupantes considerados para cada edificio según el horario se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 66: Carga sensibles por ocupantes en el edificio San Agustín. Elaboración propia.

Edificio	Horario de 8:00 a 19:00		Horario de 19:00 a 22:00	
	Ocupantes	Carga sensible [kW]	Ocupantes	Carga sensible [kW]
Salas	286	20,878	123	8,979
Profesores	50	3,650	25	1,825

Así la carga sensible debido a ocupación en horario de 8:00 a 19:00 para el edificio de salas será de 20,848 [kW], mientras que para el edificio de profesores será de 3,65 [kW]. En horario de 19:00 a 22:00 para el edificio de salas será de 8,979 [kW], mientras que para el edificio de profesores será de 1,825 [kW].

10.4.3 Carga sensible por aparatos eléctricos “ Q_{se} ”

Para el cálculo de la carga térmica aportada por los electrodomésticos se considerará que la potencia integra de funcionamiento de las máquinas y equipos presentes en el recinto se transformará en calor sensible.

Para ser coherentes con los porcentajes de ocupación considerados en ambos edificios, se considera que para el edificio de salas de 8:00 a 19:00 la carga sensible debida a aparatos eléctricos será un 70% del total, mientras que de 19:00 a 22:00 será un 30% del total. Para el edificio de profesores de 8:00 a 19:00 la carga sensible debida aparatos eléctricos será un 60% del total, mientras que de 19:00 a 22:00 será un 30% del total.

Los aparatos eléctricos corresponden principalmente a computadores a los que les se considerará una potencia de 290 [W] y a proyectores con una potencia de 477 [W] en base al trabajo de Muñoz (2017).

Las siguientes tablas resumen los cálculos y valores obtenidos:

Tabla 67: Calculo de carga sensible por aparatos eléctricos para el edificio de salas. Elaboración propia.

Piso	Computadores	Proyectores	Carga sensible electrodomésticos [KW]	70% de Q_{se} [KW]	30% de Q_{se} [KW]
1	9	5	4,995	3,497	1,499
2	9	9	6,903	4,832	2,071
3	21	3	7,521	5,265	2,256
Total edificio:			19,419	13,593	5,826

Tabla 68: Cálculo de carga sensible por aparatos eléctricos para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Piso	Computadores	Carga sensible electrodomésticos [KW]	60% de Qse [KW]	30% de Qse [KW]
1	17	4,93	2,958	1,479
2	12	3,48	2,088	1,044
3	15	4,35	2,610	1,305
4	14	4,06	2,436	1,218
Total edificio:		16,82	10,092	5,046

Finalmente, la carga sensible por aparatos eléctricos para ambos edificios es:

Tabla 69: Carga sensible debida a aparatos eléctricos para ambos edificios. Elaboración propia.

Edificio	Carga sensible de aparatos eléctricos [KW]	
	8:00 a 19:00	19:00 a 22:00
Salas	13,593	5,826
Profesores	10,092	5,046

10.5 Carga latente transmitida por infiltraciones y ventilación “ Q_{li} ”

La carga latente transmitida por infiltraciones y ventilación de aire exterior Q_{li} se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_{li} = V \cdot \rho \cdot C_{l,agua} \cdot \Delta w \quad (26)$$

Dónde:

V es el caudal de aire debido a infiltración o ventilación (m^3/s).

ρ es la densidad del aire, de valor $1,18 \text{ kg}/m^3$.

$C_{l,agua}$ es el calor específico del agua, de valor $4,184 \text{ kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$.

Δw es la diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior e interior.

Para este cálculo se consideraron los caudales de infiltración y ventilación anteriormente calculados, y las condiciones climáticas de humedad detalladas en el anexo 1, la siguiente tabla resume los valores utilizados mensualmente:

Así los valores de carga latente debido a la ventilación para ambos edificios son:

Tabla 70: Carga latente de ventilación para el edificio de salas. Elaboración propia.

Carga térmica latente por ventilación en el edificio de salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-11,153	-12,380	-12,479	-12,648	-12,479	-12,380	-11,365	-10,914	-10,533	-12,155	-11,055	-11,323
8	-9,955	-12,211	-12,324	-12,578	-12,324	-12,296	-11,450	-10,660	-10,378	-11,788	-10,011	-10,237
9	-7,248	-9,546	-10,110	-11,619	-11,929	-11,661	-11,111	-10,138	-9,052	-10,195	-7,642	-7,967
10	-4,540	-6,881	-7,896	-10,660	-11,534	-11,027	-10,773	-9,616	-7,727	-8,601	-5,274	-5,697
11	-3,314	-5,358	-5,598	-9,179	-10,011	-9,927	-9,814	-8,150	-6,416	-7,290	-4,428	-4,738
12	-2,087	-3,835	-3,299	-7,699	-8,488	-8,827	-8,855	-6,684	-5,104	-5,979	-3,582	-3,779
13	-1,777	-3,074	-2,679	-6,895	-7,783	-8,291	-8,108	-6,289	-4,780	-5,640	-2,975	-3,356
14	-1,466	-2,312	-2,059	-6,091	-7,078	-7,755	-7,360	-5,894	-4,456	-5,302	-2,369	-2,933
15	-1,481	-2,115	-2,171	-6,275	-7,290	-7,642	-7,121	-5,964	-4,766	-5,400	-2,496	-3,032
16	-1,495	-1,918	-2,284	-6,458	-7,501	-7,530	-6,881	-6,035	-5,076	-5,499	-2,623	-3,130
17	-1,946	-2,284	-3,257	-7,205	-8,545	-8,601	-7,783	-6,923	-5,668	-6,218	-3,314	-3,666
18	-2,397	-2,651	-4,230	-7,953	-9,588	-9,673	-8,686	-7,812	-6,261	-6,937	-4,005	-4,202
19	-3,624	-3,934	-6,049	-9,165	-10,463	-10,519	-9,786	-9,010	-7,360	-8,136	-5,471	-5,203
20	-4,851	-5,217	-7,868	-10,378	-11,337	-11,365	-10,886	-10,209	-8,460	-9,334	-6,937	-6,204
21	-6,557	-6,726	-8,897	-11,097	-11,675	-11,689	-10,984	-10,674	-9,052	-10,138	-8,192	-7,685
22	-8,263	-8,235	-9,927	-11,816	-12,014	-12,014	-11,083	-11,139	-9,645	-10,942	-9,447	-9,165

Tabla 71: Carga latente de ventilación para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Carga térmica latente por ventilación en el edificio de profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-1,953	-2,167	-2,185	-2,214	-2,185	-2,167	-1,990	-1,911	-1,844	-2,128	-1,935	-1,982
8	-1,743	-2,138	-2,158	-2,202	-2,158	-2,153	-2,004	-1,866	-1,817	-2,064	-1,753	-1,792
9	-1,269	-1,671	-1,770	-2,034	-2,088	-2,041	-1,945	-1,775	-1,585	-1,785	-1,338	-1,395
10	-0,795	-1,205	-1,382	-1,866	-2,019	-1,930	-1,886	-1,684	-1,353	-1,506	-0,923	-0,997
11	-0,580	-0,938	-0,980	-1,607	-1,753	-1,738	-1,718	-1,427	-1,123	-1,276	-0,775	-0,829
12	-0,365	-0,671	-0,578	-1,348	-1,486	-1,545	-1,550	-1,170	-0,894	-1,047	-0,627	-0,662
13	-0,311	-0,538	-0,469	-1,207	-1,363	-1,452	-1,419	-1,101	-0,837	-0,987	-0,521	-0,588
14	-0,257	-0,405	-0,360	-1,066	-1,239	-1,358	-1,289	-1,032	-0,780	-0,928	-0,415	-0,513
15	-0,259	-0,370	-0,380	-1,099	-1,276	-1,338	-1,247	-1,044	-0,834	-0,945	-0,437	-0,531
16	-0,262	-0,336	-0,400	-1,131	-1,313	-1,318	-1,205	-1,057	-0,889	-0,963	-0,459	-0,548
17	-0,341	-0,400	-0,570	-1,261	-1,496	-1,506	-1,363	-1,212	-0,992	-1,089	-0,580	-0,642
18	-0,420	-0,464	-0,741	-1,392	-1,679	-1,693	-1,521	-1,368	-1,096	-1,215	-0,701	-0,736

19	-0,634	-0,689	-1,059	-1,605	-1,832	-1,842	-1,713	-1,577	-1,289	-1,424	-0,958	-0,911
20	-0,849	-0,913	-1,377	-1,817	-1,985	-1,990	-1,906	-1,787	-1,481	-1,634	-1,215	-1,086
21	-1,148	-1,178	-1,558	-1,943	-2,044	-2,046	-1,923	-1,869	-1,585	-1,775	-1,434	-1,345
22	-8,538	-1,442	-1,738	-2,069	-2,103	-2,103	-1,940	-1,950	-1,688	-1,916	-1,654	-1,605

Los valores de carga latente debido a infiltración están dados por las siguientes tablas:

Tabla 72: Carga latente de infiltración para el edificio de salas. Elaboración propia.

Carga térmica latente por infiltración en el edificio de salas [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-5,858	-6,502	-6,554	-6,643	-6,554	-6,502	-5,969	-5,732	-5,532	-6,384	-5,806	-5,947
8	-5,228	-6,413	-6,473	-6,606	-6,473	-6,458	-6,013	-5,599	-5,451	-6,191	-5,258	-5,377
9	-3,807	-5,014	-5,310	-6,102	-6,265	-6,125	-5,836	-5,325	-4,755	-5,354	-4,014	-4,184
10	-2,385	-3,614	-4,147	-5,599	-6,058	-5,791	-5,658	-5,051	-4,058	-4,518	-2,770	-2,992
11	-1,740	-2,814	-2,940	-4,821	-5,258	-5,214	-5,154	-4,281	-3,370	-3,829	-2,325	-2,488
12	-1,096	-2,014	-1,733	-4,044	-4,458	-4,636	-4,651	-3,510	-2,681	-3,140	-1,881	-1,985
13	-0,933	-1,614	-1,407	-3,621	-4,088	-4,355	-4,258	-3,303	-2,511	-2,962	-1,563	-1,763
14	-0,770	-1,215	-1,081	-3,199	-3,718	-4,073	-3,866	-3,096	-2,340	-2,785	-1,244	-1,540
15	-0,778	-1,111	-1,140	-3,296	-3,829	-4,014	-3,740	-3,133	-2,503	-2,836	-1,311	-1,592
16	-0,785	-1,007	-1,200	-3,392	-3,940	-3,955	-3,614	-3,170	-2,666	-2,888	-1,377	-1,644
17	-1,022	-1,200	-1,711	-3,784	-4,488	-4,518	-4,088	-3,636	-2,977	-3,266	-1,740	-1,926
18	-1,259	-1,392	-2,222	-4,177	-5,036	-5,080	-4,562	-4,103	-3,288	-3,644	-2,103	-2,207
19	-1,903	-2,066	-3,177	-4,814	-5,495	-5,525	-5,140	-4,732	-3,866	-4,273	-2,873	-2,733
20	-2,548	-2,740	-4,132	-5,451	-5,954	-5,969	-5,717	-5,362	-4,443	-4,903	-3,644	-3,259
21	-3,444	-3,533	-4,673	-5,828	-6,132	-6,139	-5,769	-5,606	-4,755	-5,325	-4,303	-4,036
22	-4,340	-4,325	-5,214	-6,206	-6,310	-6,310	-5,821	-5,851	-5,066	-5,747	-4,962	-4,814

Tabla 73: Carga latente de infiltración para el edificio de profesores. Elaboración propia.

Carga térmica latente por infiltración en el edificio de profesores [kW]												
Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	-0,146	-0,162	-0,164	-0,166	-0,164	-0,162	-0,149	-0,143	-0,138	-0,159	-0,145	-0,149
8	-0,131	-0,160	-0,162	-0,165	-0,162	-0,161	-0,150	-0,140	-0,136	-0,155	-0,131	-0,134
9	-0,095	-0,125	-0,133	-0,152	-0,156	-0,153	-0,146	-0,133	-0,119	-0,134	-0,100	-0,104
10	-0,060	-0,090	-0,104	-0,140	-0,151	-0,145	-0,141	-0,126	-0,101	-0,113	-0,069	-0,075

11	-0,043	-0,070	-0,073	-0,120	-0,131	-0,130	-0,129	-0,107	-0,084	-0,096	-0,058	-0,062
12	-0,027	-0,050	-0,043	-0,101	-0,111	-0,116	-0,116	-0,088	-0,067	-0,078	-0,047	-0,050
13	-0,023	-0,040	-0,035	-0,090	-0,102	-0,109	-0,106	-0,082	-0,063	-0,074	-0,039	-0,044
14	-0,019	-0,030	-0,027	-0,080	-0,093	-0,102	-0,097	-0,077	-0,058	-0,070	-0,031	-0,038
15	-0,019	-0,028	-0,028	-0,082	-0,096	-0,100	-0,093	-0,078	-0,063	-0,071	-0,033	-0,040
16	-0,020	-0,025	-0,030	-0,085	-0,098	-0,099	-0,090	-0,079	-0,067	-0,072	-0,034	-0,041
17	-0,026	-0,030	-0,043	-0,095	-0,112	-0,113	-0,102	-0,091	-0,074	-0,082	-0,043	-0,048
18	-0,031	-0,035	-0,055	-0,104	-0,126	-0,127	-0,114	-0,102	-0,082	-0,091	-0,053	-0,055
19	-0,048	-0,052	-0,079	-0,120	-0,137	-0,138	-0,128	-0,118	-0,097	-0,107	-0,072	-0,068
20	-0,064	-0,068	-0,103	-0,136	-0,149	-0,149	-0,143	-0,134	-0,111	-0,122	-0,091	-0,081
21	-0,086	-0,088	-0,117	-0,146	-0,153	-0,153	-0,144	-0,140	-0,119	-0,133	-0,107	-0,101
22	-0,108	-0,108	-0,130	-0,155	-0,158	-0,158	-0,145	-0,146	-0,126	-0,144	-0,124	-0,120

10.6 Carga latente debido a la ocupación “ Q_{lp} ”

La carga latente debido a ocupación del local Q_{lp} se determina multiplicando la valoración del calor latente emitido por la persona tipo y por el número de ocupantes previstos para el local, la expresión sería la siguiente:

$$Q_{lp} = n \cdot C_{latente, persona} \quad (27)$$

Siendo:

n el número de personas que se espera que ocupen el local.

$C_{latente, persona}$ es el calor latente por persona y actividad que realice.

Se considero un valor de calor latente que emite una persona sentada haciendo un trabajo ligero como escribir de 75 W, según la ISO 7730.

La tabla siguiente resume los valores de carga latente según los ocupantes de cada edificio.

Tabla 74: Valores de carga latente debido a ocupación totales en el edificio San Agustín. Elaboración propia.

Edificio	Horario de 8:00 a 19:00		Horario de 19:00 a 22:00	
	Ocupantes	Carga latente [kW]	Ocupantes	Carga latente [kW]
Salas	286	21,450	123	9,225
Profesores	50	3,750	25	1,875

11. Anexo 3: Dimensionamiento del sistema de radiadores.

Con el fin de poder utilizar una bomba de calor geotérmica que permitiría trabajar con un régimen de temperaturas menor a 55°C, es necesario renovar el sistema de distribución mediante radiadores del edificio San Agustín. Se escogieron radiadores Low-H2O de la empresa Jaga debido a que diversos estudios (Arnabat,2015) le otorgan la eficiencia más alta en emisión a temperaturas de aguas bajas y altas y un menor consumo de energía respecto a otros modelos. Por ejemplo, el Instituto KIWA holandés le otorga mejores resultados que los sistemas de suelo radiante

Para tener una aproximación de cuanto sería el costo de renovar todo el sistema actual se consideraron los valores de carga peak de calefacción para ambos edificios, estos serían: 60 KW para el edificio de salas y 15 KW para el edificio de profesores. El considerar los valores peak asegura que se cubren todas las demandas energéticas inferiores.

El coeficiente W/m^2 nos indica la cantidad de potencia necesaria por metro cuadrado de superficie para mantener una determinada condición térmica en un recinto. Conocer este coeficiente es necesario para calcular la potencia que deberá cubrir cada emisor térmico.

Para obtenerlo utilizamos la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{\text{Carga peak edificio}}{\text{Superficie total a calefactar}} \quad (28)$$

Como superficie a calefactar se consideraron solamente las áreas correspondientes a oficinas o salas en ambos edificios, los valores se obtuvieron de los planos de ambos edificios.

Considerando la expresión anterior, para ambos edificios tenemos:

Tabla 75: Superficies a calefactar en ambos edificios.

	Edificio	
	Salas	Profesores
Superficie a calefactar [m ²]	1207,43	488,24
Carga peak [W]	60000	15000
Coeficiente [W/m ²]	49,69	30,72

Luego para cada sala u oficina se determinó cuanta potencia se requería para ese sector mediante la expresión:

$$\text{Potencia sector} = \text{Superficie sector} \cdot \text{Coeficiente} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (29)$$

Se escogió el radiador Jaga modelo Tempo pared debido a su relación costo-beneficio, este se comercializa en diferentes tamaños según sus potencias térmicas. La elección fue exclusivamente con un criterio económico, ósea el modelo que entrega mayores valores de potencia con un menor coste. Además, para evitar sobredimensionar el sistema y aumentar los costes, debido a la que las cargas peak solo ocurren en periodos puntuales, se escogieron modelos que cubrieran por lo menos un 80% de la potencia necesaria para cada sector.

Con las consideraciones anteriores, las tablas siguientes resumen la potencia necesaria para cada sector y el modelo de radiador tempo pared que cubre esa demanda. La información de los modelos fue extraída de la página del fabricante.

Tabla 76: Radiadores necesarios para el edificio de salas.

	Sector	Superficie [m ²]	Potencia sector[W]	Modelo	Potencia modelo [W]	Cantidad
Piso 1	1	55,10	2738,07	50x200x20	2406	1
	2	121,54	6039,65	60x220x20	2869	2
	3	121,54	6039,65	60x220x20	2869	2
	4	68,64	3410,91	60x120x20	1562	2
	5	68,64	3410,91	60x120x20	1562	2
	6	54,00	2683,41	50x200x20	2406	1
Piso 2	7	55,10	2738,07	50x200x20	2406	1
	8	30,74	1527,55	60x110x20	1423	1
	9	30,74	1527,55	60x110x20	1423	1
	10	30,74	1527,55	60x110x20	1423	1
	11	30,74	1527,55	60x110x20	1423	1
	12	68,64	3410,91	60x120x20	1562	2
	13	75,68	3760,75	60x120x20	1562	2
	14	62,64	3112,75	60x120x20	1562	2
	15	30,75	1528,05	60x110x20	1423	1
Piso 3	16	55,10	2738,07	50x200x20	2406	1
	17	28,08	1395,37	60x110x20	1423	1
	18	39,70	1972,80	60x140x20	1822	1
	19	18,70	929,25	60x70x20	911	1
	20	12,70	631,10	40x60x20	650	1
	21	37,41	1859,01	60x140x20	1822	1
	22	7,10	352,82	30x40x20	373	1
	23	7,60	377,66	30x40x20	373	1

	24	7,00	347,85	30x40x20	373	1
	25	7,20	357,79	30x40x20	373	1
	26	9,60	477,05	40x40x20	433	1
	27	8,20	407,48	40x40x20	433	1
	28	8,00	397,54	40x40x20	433	1
	29	9,60	477,05	40x40x20	433	1
	30	46,20	2295,80	60x160x20	2082	1
	Total	1207,42	60000,00			

Tabla 77: Radiadores necesarios para el edificio de profesores.

	Sector	Superficie [m ²]	Potencia sector[W]	Modelo	Potencia modelo [W]	Cantidad
Piso 1	1	13,68	420,3	40x40x20	433	1
	2	13,68	420,3	40x40x20	433	1
	3	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	4	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	5	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	6	30,70	943,2	60x70x20	911	1
	7	8,06	247,6	30x40x15	267	1
	8	8,00	245,8	30x40x15	267	1
	9	8,55	262,7	30x40x15	267	1
	10	8,40	258,1	30x40x15	267	1
Piso 2	11	24,60	755,8	40x60x20	650	1
	12	14,29	439,0	40x40x20	433	1
	13	17,11	525,7	40x50x20	541	1
	14	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	15	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	16	8,41	258,4	30x40x15	267	1
	17	8,26	253,8	30x40x15	267	1
	18	8,40	258,1	30x40x15	267	1
	19	8,00	245,8	30x40x15	267	1
	20	10,78	331,2	50x40x15	344	1
	21	13,60	417,8	40x40x20	433	1
Piso 3	22	11,00	337,9	50x40x15	344	1

	23	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	24	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	25	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	26	8,12	249,5	30x40x15	267,0	1
	27	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	28	11,00	337,9	50x40x15	344	1
	29	11,00	337,9	50x40x15	344	1
	30	16,60	510,0	40x50x20	541	1
	31	8,00	245,8	30x40x15	267	1
	32	8,30	255,0	30x40x15	267	1
	33	11,00	337,9	50x40x15	344	1
Piso 4	34	11,00	337,9	50x40x15	344	1
	35	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	36	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	37	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	38	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	39	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	40	8,12	249,5	30x40x15	267	1
	41	11,00	337,9	30x40x15	267	1
	42	11,00	337,9	30x40x15	267	1
	43	16,60	510,0	40x50x20	541	1
	44	8,00	245,8	30x40x15	267	1
	45	8,30	255,0	30x40x15	267	1
	46	11,00	337,9	50x40x15	344	1
		Total:	488,24	15000,0		