

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**SEDE VIÑA DEL MAR- JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**MEMORIA DE CÁLCULO EN SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR  
GEOTERMIA**

Trabajo de Titulación para optar  
al Título de Ingeniero de  
Ejecución en MECÁNICA DE  
PROCESOS Y  
MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL

Alumno:

Gonzalo Daniel Pizarro Poblete

Profesor Guía:

Eduardo Vidal

Profesor Correferente:

Adrián Ortiz



## RESUMEN

**KEYWORDS:** Geotermia – Climatización – Bomba de Calor – Aislación – Fan coil – Recuperador de Calor – Calefacción – Transmitancia Térmica – Pérdida de Calor.

Este trabajo nace de la idea de presentar nuevas tecnologías innovadoras que impacten dentro de la sociedad y que al mismo tiempo presente soluciones a situaciones poco favorables con el medio ambiente.

La idea principal del trabajo, es presentar un sistema de calefacción para un Liceo en la ciudad de Coyhaique, ciudad que se encuentra dentro de la zona austral de nuestro país y que por ende presenta grandes necesidades en materia de calefacción para la comunidad debido a las bajas temperaturas, utilizando como recurso energético la geotermia. La investigación se centrará principalmente en buscar tecnologías o métodos que respalden al sistema instalado, buscando maneras de impactar tanto en la eficiencia o en los costos asociados.

Actualmente, el método de calefacción que se encuentra arraigado dentro de la ciudad de Coyhaique consiste en la combustión lenta de leña, que cada año se ve afectada con la creciente contaminación de material particulado debido a esta práctica, sumándole a esto que la leña que se consume hoy en día es verde, bajando la eficiencia de este método.

Para lograr este cometido, se debe hacer un estudio de prefactibilidad técnica, donde se indique que los terrenos de los colegios preseleccionados presentan las condiciones adecuadas, y que permita la explotación adecuada de los recursos geotérmicos en el lugar. Dado el caso, se deben determinar las características físicas que presentan los Liceos y si es apto el recurso geotérmico para dar cabida a la demanda energética que se necesita. Es importante establecer las variables que influyen dentro de la eficiencia de los sistemas, con el fin de poder establecer soluciones que impacten dentro del rendimiento.

Una vez contemplado el diseño apto para dar solución a la demanda energéticas del colegio, se hará una investigación de posibles opciones para su implementación dentro del mismo sistema, con el fin de dar un respaldo desde el punto de vista energético. Es importante el estudio del diseño, para poder identificar qué aspectos del colegio representan un costo energético para el sistema, y de esa manera buscar falencias que pueden dar cabida a soluciones.

El trabajo permitirá el estudio acabado del diseño y dimensionamiento de los principales equipos que se requieren para la explotación del recurso geotérmico, tales como la bomba de calor, los equipos fan coil, las bombas de circulación, etc. También permitirá aprovechar aspectos que intervienen en la eficiencia y ser capaz de buscar tecnologías que complementen al sistema actual.

## ÍNDICE DE MATERIAS

<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES GENERALES.....	6
1.1.1 GEOTERMIA.....	6
1.1.2 TIPOS DE GEOTERMIA Y APLICACIONES.....	7
1.1.3 GEOTERMIA DE MUY BAJA TEMPERATURA.....	8
1.2 HISTORIA DEL PROYECTO.....	10
1.2.1 CEGA.....	11
1.2.2 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	12
1.3 CONDICIONES TÉCNICAS.....	14
1.3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	15
1.3.2 INFRAESTRUCTURA DEL EDIFICIO.....	21
1.3.3 CONDICIONES GEOLÓGICAS.....	27
1.4 PROBLEMÁTICA.....	31
<b>CAPÍTULO 2 DISEÑO DEL SISTEMA</b> .....	<b>33</b>
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA.....	34
2.2 DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR.....	37
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS DE CIRCULACIÓN.....	51
2.4 DIMENSIONAMIENTO ESTANQUE DE INERCIA.....	54
2.5 COSTOS ASOCIADOS AL PROYECTO.....	56
<b>CAPÍTULO 3 PROPUESTAS DE MEJORAS</b> .....	<b>61</b>
3.1 MEJORA DE AISLACIÓN ESTRUCTURAL.....	62
3.2 DISEÑO PARA MEJORA EN AISLACIÓN.....	62
3.3 DISEÑO PARA MEJORA CON RECUPERADORES DE CALOR.....	70
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>81</b>
ANEXO 1: BOMBA DE CALOR ECOFOREST.....	81
ANEXO 2: FAN COIL MKG 600 B.....	82
ANEXO 3: BOMBAS DE CIRCULACIÓN.....	83
ANEXO 4: RECUPERADORES DE CALOR.....	84
ANEXO 5: DISTRIBUCIÓN DE LAS REDES DE AGUA.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Estructura Interna de la Tierra.....	6
Figura 1-2 Matriz de criticidad.....	13
Figura 1-3 Liceo Bicentenario Altos del Mackay.....	14
Figura 1-4 Mapa de climatización según Nch 1079-2008.....	15
Figura 1-5 Sección del plano Liceo Altos del Mackay para los sectores de intervención del proyecto.....	22
Figura 1-6 Conformación de Muros en Pabellón 1.....	23
Figura 1-7 Fotografía de cámara termográfica en puertas y ventanas pabellón 1.....	24
Figura 1-8 Fotografía del Pabellón 2.....	24
Figura 1-9 Conformación de muros del Pabellón 2.....	25
Figura 1-10 Fotografía de cámara termográfica en puerta de pabellón 2.....	25
Figura 1-11 Sala de clases de Pabellón 3.....	26
Figura 1-12 Conformación de muros del pabellón 3.....	27
Figura 1-13 Medición de Resistividad dentro del Liceo (ERT).....	28

Figura 1-14 Puntos para los Pozos de Extracción y Reinyección dentro del Liceo Bicentenario Altos del Mackay (Punto Rojo Pozo de Extracción – Punto Azul Pozo de Reinyección).....	29
Figura 1-15 Pruebas de bombeo del pozo de extracción en Liceo Bicentenario Altos del Mackay .....	30
Figura 2-1 Esquema hidráulico para la instalación del proyecto .....	36
Figura 2-2 Ciclo de Carnot Inverso .....	37
Figura 2-3 Diagrama Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor.....	38
Figura 2-4 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor .....	39
Figura 2-5 Nomograma para obtener Resistencia térmica para cámaras de aire no ventiladas .....	44
Figura 2-6 Fotografía termográfica del techo mostrando los puentes térmicos por los perfiles de acero .....	44
Figura 2-7 Modelado y simulación por Sketchup .....	48
Figura 2-8 Bomba de Calor Ecoforest.....	50
Figura 2-9 Coeficientes de pérdida para Fitting.....	53
Figura 2-10 Curva característica de la bomba Wilo Top S 30/10.....	54
Figura 2-11 Estanque de almacenamiento del sistema de calefacción.....	56
Figura 2-12 Caldera y Radiadores del Liceo Altos del Mackay .....	57
Figura 2-13 Estufas de combustión lenta, a la izquierda se ve la poca eficiencia de transmisibilidad con los alrededores y a la derecha las temperaturas de trabajo. ....	57
Figura 3-1 Aplicación de revestimiento para muros exteriores según sistema ETICS ...	65
Figura 3-2 Instalación de lana Mineral sobre cubierta en entretecho.....	66
Figura 3-3 Esquema típico para recuperador de calor de flujos cruzados .....	70
Figura 3-4 Instalación de FRESHBOX 60 .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Aplicación Geotérmica en función de la Temperatura .....	7
Tabla 1-2 Resultado de los Fondos Concursables FIC 2017 .....	10
Tabla 1-3 3 Matriz de Decisión.....	13
Tabla 1-4 Rango para niveles de emergencia medioambiental para MP10.....	19
Tabla 1-5 Medición del Caudal a distintas profundidades .....	30
Tabla 2-1 Resistencias térmicas de superficie para distintos sentidos de flujo .....	41
Tabla 2-2 Extracto Conductividades térmicas para distintos materiales .....	41
Tabla 2-3 Transmitancia térmica lineal para los niveles de aislación .....	45
Tabla 2-4 Transmitancia térmicas para los distintos pabellones.....	46
Tabla 2-5 Pérdidas de carga y Caudales para los distintos pabellones.....	53
Tabla 2-6 Costos asociados a la construcción e instalación del proyecto .....	59
Tabla 2-7 Tarifa de costos eléctricos para la ciudad de Coyhaique .....	59
Tabla 2-8 Resumen de costos para el sistema de calefacción en Liceo .....	60
Tabla 3-1 Transmitancias térmicas para Sur Extremo en Chile.....	62
Tabla 3-2 Espesores para Aislación .....	65
Tabla 3-3 Valores para instalación de Aislación.....	67
Tabla 3-4 Valor para aislación en cubierta de pabellón 2 .....	68
Tabla 3-5 Valor para aislación en cubierta de pabellón 1 y 3.....	68
Tabla 3-6 Resumen de Costos Para el sistema de calefacción con aislación mejorada en Liceo .....	69
Tabla 3-7 Costos unitarios para instalación de Equipos Recuperadores de Calor .....	73
Tabla 3-8 Costos anuales en sistema con recuperadores de Calor .....	74

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1-1 Emisiones de CO2 anualmente en el mundo .....	9
Gráfica 1-2 Emisiones de CO2 asociadas a distinto combustibles.....	9
Gráfica 1-3 Temperaturas Ambiente Máximas y Mínimas en Coyhaique .....	16
Gráfica 1-4 Irradiancia en Coyhaique durante el año 2018 .....	18
Gráfica 1-5 Material Particulado MP10 del año 2018.....	20
Gráfica 2-1 Aporte mensual solar por las ventanas .....	48
Gráfica 2-2 Potencia promedio por mes .....	49
Gráfica 2-3 Demanda energética promedio por Mes.....	50
Gráfica 2-4 Distribución de las inversiones para el proyecto .....	58
Gráfica 3-1 Comparación en mejora de Aislación .....	63
Gráfica 3-2 Comparación de eficiencia con distintas opciones de mejora .....	72

## SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

### SIGLAS

ACS	: Agua Caliente Sanitaria
ASC	: Área de Superficie Corporal
CEGA	: Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes
CLP	: Peso Chileno
CONICYT	: Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
COP	: Coefficient of Performance
DOE	: Departamento de Energía de los Estados Unidos
ERNC	: Energías Renovables no Convencionales
ERT	: Tomografía de Resistividad eléctrica
ETICS	: Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior
FIC	: Fondos de Innovación a la Competitividad
FONDAP	: Fondos de financiamiento de centros de investigación en áreas prioritarias
INIA	: Instituto de Investigaciones Agropecuarias
IVA	: Impuesto al Valor Agregado
MP	: Material Particulado
NCh	: Norma Chilena
SAESA	: Sociedad Austral de Electricidad S.A.
TDR	: Términos de Referencia estandarizados
TEM	: Transiente Electromagnético

## SIMBOLOGÍA

\$	: signo de dinero
%	: Porcentaje
°C	: Grados Celsius
µg	: microgramo
A	: Área
cm	: centímetros
E	: Emisividad
h	: horas
J	: Joule
K	: Grado Kelvin
kcal	: kilocaloría
kg	: kilogramo
kJ	: kiloJoule
kW	: kilowatt
kWh	: kiloWatt hora
l	: litro
m	: metro
m.s.n.m.	: metros sobre el nivel del mar
m <sup>2</sup>	: metro cuadrado
m <sup>3</sup>	: metro cúbico
min	: minuto
mm	: milímetros
MW	: MegaWatt
MWh	: MegaWatt hora
Q	: Potencia Calorífica
R	: Resistencia Térmica
s	: segundo
S	: Entropía
T	: Temperatura
U	: Transmitancia
v	: velocidad
λ	: Conductividad Térmica

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el uso de energías renovables pasa a ser una opción que pretende combatir el uso de energías no renovables como lo son los combustibles fósiles. Dentro de la gama de opciones que encontramos, se tienen energías renovables como la solar, eólica, biomasa, mareomotriz, hidroeléctrica, geotérmica, etc.

Estas energías cada vez son de mayor uso dentro de la sociedad actual, debido a la conciencia que se ha tomado con relación a la contaminación producida y por lo que se buscan alternativas para dar solución.

Chile presenta condiciones que favorecen el uso de estas energías, debido a razones como que tenemos el índice de radiación solar más alto del mundo, fuertes vientos que van de norte a sur para desarrollar energía eólica, una gran extensión de mar para explorar con energías marítimas, y un gran potencial de recursos geotérmicos a lo largo de nuestra cordillera. Un estudio realizado por el Bloomberg NEF y el Banco Interamericano del Desarrollo, coloca a Chile en el primer puesto por ser el país que más invierte en aplicaciones para Energías Renovables y en la lucha contra el cambio climático, dentro de la región de América Latina y el Caribe.

La energía geotérmica es una de las llamadas “Energía Renovables No Convencionales” (ERNC), sigla que también junta a las energía eólica, solar, mareomotriz, etc. Las ERNC son claves para disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> y combatir el llamado “Efecto Invernadero” en el planeta, pero son también más caras, por lo que poco a poco se han venido introduciendo en el mercado que cada vez se posicionan como más competentes.

La geotermia, se encarga de utilizar el calor de las profundidades de la tierra para poder generar energía. Sus principales aplicaciones radican en la climatización de estructuras habitables (calefacción), o la generación de electricidad a través de distintos métodos. Una ventaja importante de este recurso es que la temperatura de las profundidades es prácticamente constante durante todo el año, no afectando las temperaturas ambientales, aunque por otro lado también depende de las condiciones geológicas del terreno por lo que debe haber una evaluación previa para implementar un sistema de generación geotérmico.

En Chile, la Asociación de Generadoras, estima que el potencial geotérmico en el norte del país es de unos 2.000 MW, y en el centro de unos 1.350 MW, con un factor de capacidad que va desde el 60% hasta el 90%. Esto se debe a que está situado dentro del cinturón de fuego del pacífico, lugar favorecido en materia de recursos geotérmicos.

Con motivo de dar un aporte a las nuevas aplicaciones y tecnologías que se vienen desarrollando, se calculará y dimensionará un sistema de calefacción para un colegio que se energizará mediante el uso de la geotermia. Es objetivo de este trabajo el poder proponer mejoras que ayuden en la implementación y uso de este recurso, para poder obtener mejores rendimientos en el sistema como tal.



### **OBJETIVO GENERAL**

- Calcular un Sistema de Calefacción por Geotermia de baja entalpía en un Colegio de Coyhaique para generar mejoras que impacten en su rendimiento.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las distintas características que intervienen en el cálculo del sistema, especificando condiciones técnicas en infraestructura, recurso geotérmico, normativa vigente, condiciones climáticas, etc.
- Especificar las características técnicas de los equipos describiendo el funcionamiento de cada uno, justificación técnica de la selección y la función que cumplen dentro del sistema en base a la información técnica disponible por los fabricantes.
- Presentar mejoras en el diseño puesto, con el fin de aumentar el rendimiento del sistema.
- Analizar la inversión para las propuestas, viendo el impacto que tiene dentro de los costos asociados al funcionamiento del sistema.



## **CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES GENERALES**

## **1.1 ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1.1 GEOTERMIA**

La palabra geotermia tiene sus inicios a partir de la derivación en griego “geos” que significa tierra, y “thermos” que significa calor, traduciéndolo en “el calor de la tierra”. Se define como la energía almacenada en forma de calor que se encuentra bajo la superficie de la tierra. El alcance de esta definición engloba a aguas subterráneas, rocas y suelos, cualquiera sea su procedencia, profundidad y temperatura, sin embargo, no incluye al calor almacenado en masas de aguas superficiales, aun así, siendo aprovechables la temperatura de estas mismas, aunque no se podría clasificar de geotermia estrictamente.

Este concepto se ocupa tanto en la industria de explotación geotérmica, como en las ciencias que estudian fenómenos asociados.

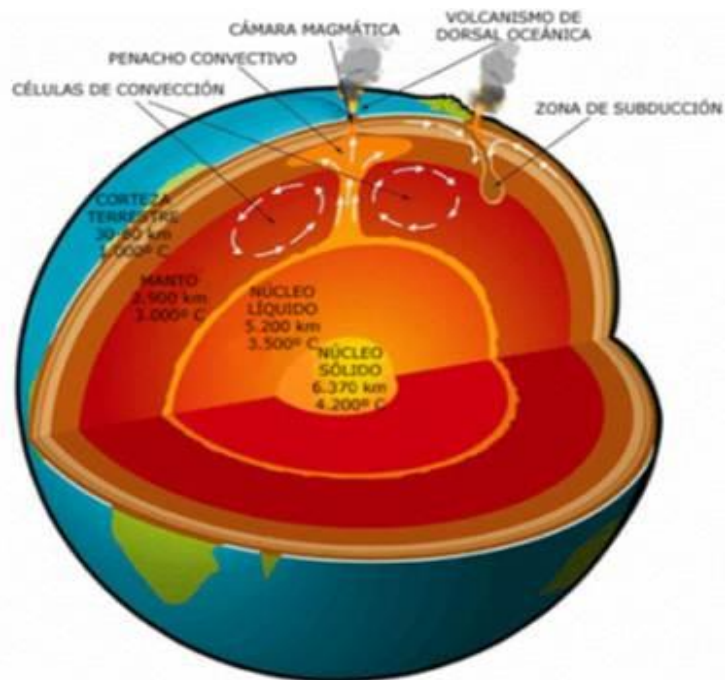


Figura 1-1 Estructura Interna de la Tierra  
Fuente: Site géothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM

El globo terrestre comprende 3 capas sucesivas de temperatura creciente desde la superficie hasta el centro: La corteza, el manto y el núcleo.

- La corteza es la capa superficial de la tierra. La temperatura varía desde los 15°C hasta los 1000°C desde la superficie hasta el contacto que tiene con el manto. Su profundidad alcanza los 20 km bajo los océanos, hasta los 70 km que hay bajo los continentes.

- El manto es capaz de alcanzar temperaturas que llegan hasta los 3000°C. Siendo más bien de una textura plástica en contacto con el núcleo, hasta una textura sólida en contacto con la corteza.
- El núcleo es sólido en su parte interna y líquido en su exterior, alcanzado temperaturas que llegan hasta los 4200°C.

([Marco Antonio Seisdedos Sáez, 2012, U. de Chile](#)).

### **1.1.2 TIPOS DE GEOTERMIA Y APLICACIONES**

Las aplicaciones dentro de la geotermia dependen principalmente de la cantidad de calor que posean, o lo que es más preciso aún, de su entalpía. Se conoce como entalpía la energía térmica que un sistema en estudio es capaz de intercambiar con su entorno, en unidades típicas de kJ/kg o en kcal/kg, en síntesis, unidad de energía sobre unidad de masa.

Si bien no existen aparatos o instrumentos que sean capaces de medir directamente la entalpía de fluidos en el subsuelo, si existen sondas térmicas capaces de medir la temperatura, y debido a que ambas son proporcionales, en la práctica habitual se ha extendido el uso de las temperaturas como medio de referencia para la aplicación de la energía geotérmica, debido a que las temperaturas finalmente determinarán la futura aplicación.

En la tabla 1-1 se especifican las distintas aplicaciones en función de la temperatura. Además, se establece una clasificación con rangos de temperatura para 4 grandes tipos: muy baja, baja, media y alta. Esta clasificación varía de acuerdo con el autor, pero es la designación oficial en el “código minero” de Francia y válida para toda aplicación bajo el suelo.

Tabla 1-1 Aplicación Geotérmica en función de la Temperatura



Fuente: [grupo02termo.wordpress.com](http://grupo02termo.wordpress.com)

Se forman estos grupos principalmente debido a la generalización que tienen sus aplicaciones dentro del mercado, por ende, se pueden orientar las aplicaciones de cada grupo desde un punto de vista general.

- **Geotermia de Alta Temperatura (Mayor de 150°C):** Temperaturas mayores a 150°C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- **Geotermia de Media Temperatura (Entre 90°C y 150°C):** Se puede producir energía eléctrica utilizando fluidos, permitiendo alimentar a las centrales.
- **Geotermia de Baja Temperatura (Entre 30°C y 90°C):** Su entalpía es baja para lograr producir energía eléctrica, por lo que tiene principalmente aplicaciones en calefacción tanto en viviendas como en edificaciones o la industria agrícola.
- **Geotermia de Muy baja Temperatura (Menor a 30°C):** Puede ocuparse para calefacción de viviendas empleando bombas de calor.

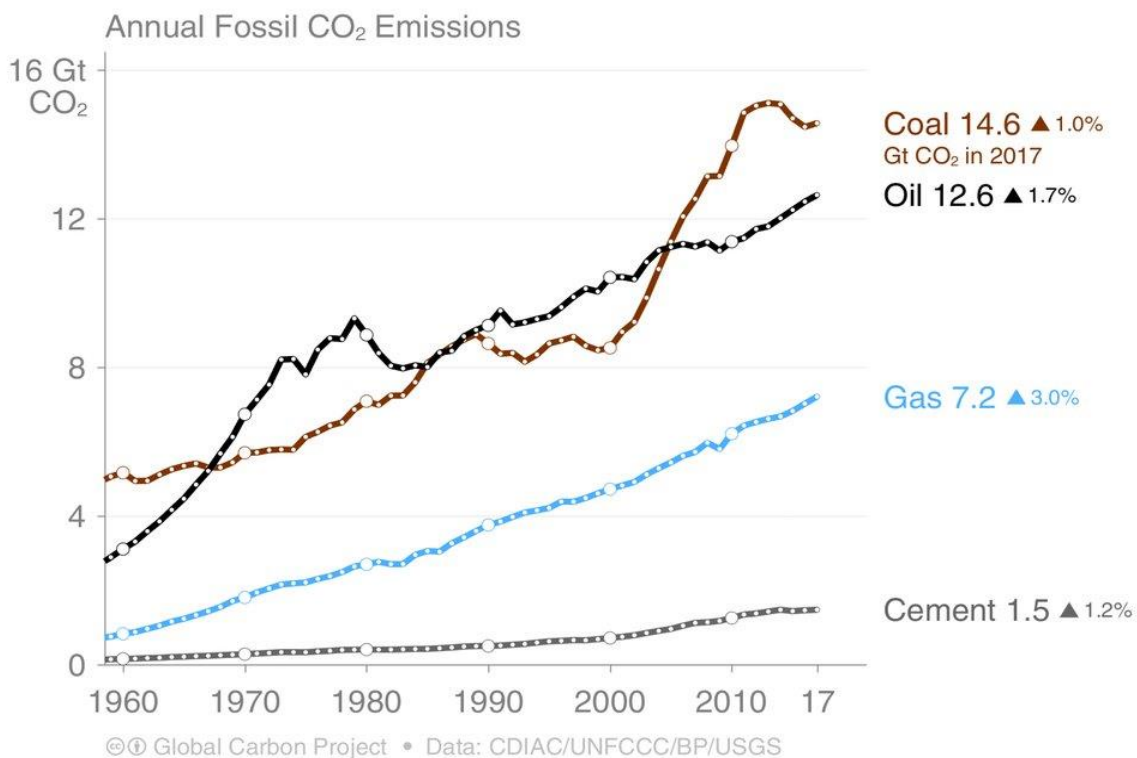
([Marco Antonio Seisdedos Sáez, 2012, U. de Chile](#)).

### **1.1.3 GEOTERMIA DE MUY BAJA TEMPERATURA**

Se entenderá por geotermia de muy baja temperatura, aquella donde la explotación de este recurso no sobrepase los 30°C. Típicamente encontramos temperaturas de trabajo en profundidades de no más de 200 metros. A estas profundidades, existe la atención de que el calor puede venir típicamente del centro del planeta, pero generalmente se ve comprendida debido a la absorción de la radiación solar que tiene en la superficie de la Tierra.

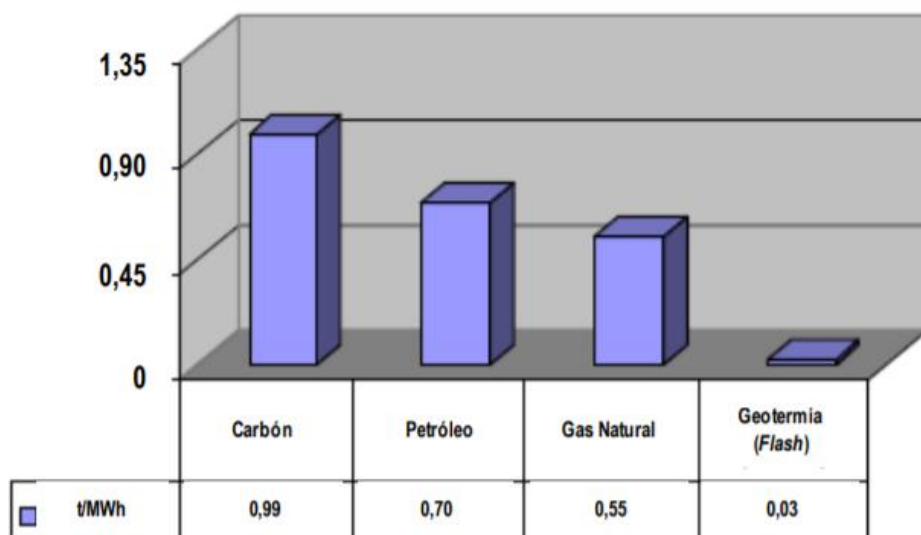
Es de considerar la cantidad de energía que obtenemos del Sol y que absorbe la superficie de la tierra en forma de calor, donde los datos apuntan a  $2 \times 10^{17}$  J, por lo tanto, al utilizar la geotermia de muy baja temperatura, aprovechamos la energía solar en su mayor medida que el calor proveniente del núcleo de la Tierra.

Una importante ventaja de este recurso es la baja emisión de CO<sub>2</sub> que tiene el proceso de calefacción mediante bomba de calor y la geotermia en general. Un estudio publicado por el Earth System Science Data muestra las tendencias de emisiones de CO<sub>2</sub> año a año en el mundo, donde el principal actor son las centrales termoeléctricas donde se ocupa carbón, llegando a emitir 14,6 Giga toneladas de CO<sub>2</sub> en el mundo. En la gráfica 1-1 se muestran las tendencias de los principales combustibles que se ocupan en el mundo con la respectiva emisión de CO<sub>2</sub> que produce su explotación hasta el año 2017.



Gráfica 1-1 Emisiones de CO<sub>2</sub> anualmente en el mundo  
Fuente: Earth System Science Data

Un estudio publicado por el departamento de energía de Estados Unidos (DOE) compara la emisión de CO<sub>2</sub> entre la producción de energía mediante geotermia y mediante combustibles fósiles o sus derivados, como media, se tiene que la emisión varía entre 0,03 y 0,04 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada MWh producido, frente a las 0,99 toneladas por cada MWh producido asociados a la generación mediante combustibles fósiles. Esto data el impacto que puede producir la energía geotérmica en el medio ambiente.



Gráfica 1-2 Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a distinto combustibles  
Fuente: DOE

## **1.2 HISTORIA DEL PROYECTO**

El proyecto que se abordará en el presente trabajo tiene sus inicios cuando se adjudican fondos de platas públicas, entidades pertenecientes al área geotérmica del país y también entidades municipales. En concreto, el gobierno regional de Aysén, en el año 2017, pone a disposición a través del concurso los *Fondos de Innovación para la Competitividad* para los proyectos a ejecutar dentro de la zona. Dichos fondos se lo adjudicaron distintos organismos para los proyectos correspondientes, donde veremos el resultado del concurso a continuación en la tabla 1-2:

Tabla 1-2 Resultado de los Fondos Concursables FIC 2017

<b>Nombre de la Iniciativa</b>	<b>Postulante</b>	<b>Monto Solicitado al FIC (M\$)</b>
Investigación Arqueológica Aysén Milenario (Código BIP N° 40000234)	Corporación Regional Aysén de Investigación y Desarrollo Cooperativo, CIEP	104.400
Degradación de materia orgánica en fiordos patagónicos (Código BIP N° 40000236)	Corporación Regional Aysén de Investigación y Desarrollo Cooperativo, CIEP	166.375
B. Ambientales para Sphagnum en Aysén (Código BIP N° 40000499)	Instituto de Investigaciones Agropecuarias	193.145
Innovación prácticas sustentable adapatación cambio climático (Código BIP N° 40000497)	Instituto de Investigaciones Agropecuarias	193.003
Bosques de Aysén: Cambio climático y compuestos bioactivos (Código BIP N° 40000496)	Universidad de Aysén	148.968
Zonificación Agroclimática Dinámica (Código BIP N° 40000494)	Universidad de Aysén	199.256
<b>Climatización Geotérmica en una Escuela de Coyhaique (Código BIP N° 40000493)</b>	<b>Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) / Universidad de Chile</b>	<b>200.000</b>
Innovación Social Escuela Taller Cocreativa (Código BIP N° 40000493)	Universidad de Magallanes	154.692
Rutas interactivas e inclusivas en Jeinimeni (Código BIP N° 40000489)	Universidad de Magallanes	104.905
Sistema Regional de Información y Seguimiento de Proyectos (Código BIP N° 40000522)	Universidad de Magallanes	98.200
Prototipo de Laboratorio Abierto de Ciencias Subantárticas (Código BIP N° 40000521)	Universidad de Magallanes	123.690
Innovación de producto en cerámica de Pto. Ibañez (Código BIP N° 40000483)	Universidad de Santiago de Chile	17.360
Recuperación Biol. De Sitios Contaminados con Metales Pesados (Código BIP N° 40000480)	Universidad Austral de Chile	111.573
Red de Museos Aysén: investigación museológica y diagnóstico (Código BIP N° 40000482)	Universidad Austral de Chile	187.326
Puesta en valor de geología y conocimiento de Dinosaurios (Código BIP N° 40000501)	Universidad Andrés Bello	195.646
<b>TOTAL</b>		<b>2.198.539</b>

Fuente: Gobierno Regional de Aysén

En total, más de dos mil millones de pesos fueron entregados a distintas instituciones para la realización de sus propuestas. Se destaca en amarillo la adjudicación por un monto de 200 millones de pesos para el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), para la realización de su propuesta en *Climatización Geotérmica en una Escuela de Coyhaique*.

Posteriormente la misma institución hace una preselección de los posibles beneficiarios a los que se puede adjudicar el proyecto dentro de la región con los que cumplen ciertos requisitos.

### **1.2.1 CEGA**

El Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, tiene sus inicios en el año 2011 con fondos de FONDAP-CONICYT se conforma en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile como un centro enfocado en la investigación y desarrollo de la geotermia. Está conformado por investigadores pertenecientes tanto a la misma universidad de Chile como también a la Pontificia Universidad Católica entre otras instituciones.

El objetivo principal de la institución es promover el uso de la geotermia para su desarrollo sustentable, amigable con el medio ambiente, y hacer de esta un recurso para aportar a los requerimientos que necesita el país y Latino América.

Dentro de las distintas líneas de investigación que abarcan el CEGA encontramos estudio de potencial geotérmico en la búsqueda de reservorios a lo largo del país, la interacción que tiene el calor junto a la mineralogía del lugar y como afectan a los campos geotérmicos desde un punto de vista químico, el modelamiento estructural tectónico de la geometría y campos geotermiales permitiendo detectar las relaciones entre fallas, unidades estratigráficas y acuíferos termales.

El CEGA finalmente termina administrando los fondos FIC con su propuesta *Climatización Geotérmica en una Escuela de Coyhaique*, buscando un lugar que impacte de manera positiva dentro de la comunidad, establecen que la intervención en un establecimiento educacional es la alternativa de mayor envergadura en la ciudad.

### **1.2.2 DESARROLLO DEL PROYECTO**

En busca de lograr un impacto en la sociedad, donde se logre demostrar transversalmente la utilización de la geotermia de baja entalpía, el CEGA discute en profundidad donde sería el mejor lugar para ejecutar el proyecto dentro de Coyhaique, se determina que la intervención de un establecimiento educacional es la alternativa de mayor impacto para su ejecución y mayores beneficios.

Una vez adjudicado los Fondos FIC, en noviembre del 2017 se preseleccionaron cuatro establecimientos en base a una adecuada aislación térmica para la ejecución del proyecto, dichos establecimientos son: Escuela Nieves del Sur, el Liceo Bicentenario Altos del Mackay, Escuela Baquedano y el Liceo Josefina Aguirre Montenegro. Posteriormente se realiza un reconocimiento en terreno, donde se visitan las dependencias de cada colegio, se recopila información entregada por la dirección de cada liceo para finalmente realizar una campaña de mediciones geológicas y geofísicas para verificar la factibilidad del subsuelo de cada establecimiento educacional.

Las mediciones geofísicas que se llevan a cabo en cada colegio permitirán dimensionar la conductividad térmica del suelo además de inspeccionar con mayor detalle la aislación de las edificaciones.

En marzo del 2018 se realiza una segunda visita técnica con el fin de dimensionar la demanda térmica y energética que se necesita para cada sala, y la alimentación eléctrica para alimentar los equipos que se usarán.

Se abarcan una amplia gama de criterios para la selección del colegio que van desde lo técnico hasta lo social. En este sentido, debido a que la escuela Baquedano como la escuela Nieves del Sur poseen un sistema de calefacción centralizado que abarca todas las salas de la escuela, la intervención se tendría que hacer en los gimnasios eventualmente. Para el caso del Liceo Josefina Aguirre Montenegro también posee un sistema de calefacción centralizado, no obstante, quedando la cafetería fuera del lugar de calefacción, por lo que intervención se podría hacer en ese lugar. Por último, el Liceo Bicentenario Altos del Mackay al tener salas que se calefaccionan con combustión lenta, permite la evaluación para una intervención total de estas inmediaciones, donde se reemplazaría parcialmente la combustión lenta por el nuevo sistema de calefacción en una parte del colegio.

A todos estos factores se les asigna un nivel de impacto (Alto, Medio, Bajo) y un grado de oportunidad para ver que tanto cumplen con la factibilidad mencionada. Se les asigna un valor ponderado en base a la matriz de la figura 1-4.

		Oportunidad		
		Bajo	Medio	Alto
Nivel de impacto	Bajo	1	2	3
	Medio	2	4	6
	Alto	3	6	9

Figura 1-2 Matriz de criticidad

Fuente: CEGA

Por último, se evalúa cada aspecto considerado para ponderar la intervención del establecimiento en una nueva matriz de decisión mostrada en la tabla 1-3.

Tabla 1-3 3 Matriz de Decisión

Ámbito	Nivel de impacto	Tópico	Oportunidad			Nieves	Baquedano	Josefina	Mackay
			Alto	Medio	Bajo				
Costos	Alto	Costos de inversión esperados	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio
Infraestructura	Alto	Nivel de aislación térmica	Buena	Normal	Mala	Buena	Buena	Mala	Normal
Infraestructura	Alto	Cercanía a una línea de transmisión eléctrica capaz de operar los equipos	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Infraestructura	Alto	Calidad de la calefacción actual (confort)	Mala	Normal	Buena	Buena	Buena	Mala	Normal
Infraestructura	Medio	Posee un sistema centralizado de distribución de calor	Sí	Casi	No	Sí	Sí	Casi	Casi
Infraestructura	Medio	Hay lugares con pozos ya construidos	Sí	-	No	No	No	No	No
Infraestructura	Bajo	Existe un empalme eléctrico con capacidad para el sistema geotérmico	Sí	-	No	No	No	No	No
Apoyo/Gestión	Alto	Comunidad escolar muestra apoyo explícito al proyecto	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Apoyo/Gestión	Medio	Experiencia anterior de la comunidad en el desarrollo de proyectos	Buena	Normal	Mala	Buena	Buena	Buena	Buena
Apoyo/Gestión	Bajo	Acomodación mínima para operadores y cuidadores	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Escalabilidad/replicabilidad	Alto	Potencial de ser escalado	Alto	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto
Escalabilidad/replicabilidad	Medio	Potencial de ser replicado técnicamente	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo
Recurso geotérmico	Alto	Existencia de acuíferos aprovechable a baja profundidad	Sí	Quizás	No	Quizás	No	No	Sí
Recurso geotérmico	Medio	Grado de incertidumbre de la cuantificación del recurso	Bajo	Medio	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Recurso geotérmico	Medio	Nivel de cobertura de la demanda energética del recinto	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto
Medioambiente	Alto	Problemas de abastecimiento de combustible	Sí	-	No	No	No	Sí	No
Medioambiente	Alto	Nivel de emisión actual de material particulado	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Conflictos potenciales	Alto	Facilidad para construir sistema	Fácil	Normal	Difícil	Difícil	Difícil	Normal	Fácil
Conflictos potenciales	Alto	Posee viabilidad legal? (derechos de agua)	Sí	Quizás	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Conflictos potenciales	Medio	Hay conflicto con actividades escolares durante la construcción	Bajo	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Social	Alto	Nivel de organización de la comunidad escolar	Alto	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio	Medio
Social	Alto	Número de beneficiarios, <x<100 Bajo; 100-<x<200 Medio, >x>200 Alto	Alto	Medio	Bajo	Medio	Alto	Alto	Alto
Social	Alto	Nivel de impacto en los beneficiarios	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Social	Medio	Nivel de vulnerabilidad y PIE	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto	Medio
Social	Bajo	Incidencia del índice de vulnerabilidad en la viabilidad del proyecto	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Difusión/extensión	Medio	Nivel de visibilidad del proyecto por parte de la comunidad	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto	Medio
Difusión/extensión	Medio	Existencia de una comunidad cercana con la que se pueda trabajar un proyecto educativo	Sí	-	No	Sí	Sí	No	No
Difusión/extensión	Bajo	Se cuenta con un área o grupo estudiantil de ciencia y/o tecnología	Sí	-	No	No	Sí	Sí	No
Difusión/extensión	Bajo	Se cuenta con canales de comunicación internos que permitan divulgar información entre sus integrantes	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Difusión/extensión	Bajo	La comunidad educativa está dispuesta a recibir comunidades externas y difundir el proyecto tecnológico	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto
Difusión/extensión	Bajo	La comunidad educativa cuenta con redes con otras instituciones para difundir el proyecto tecnológico	Sí	-	No	Sí	Sí	Sí	Sí
PUNTAJE						136	142	153	163

Fuente: CEGA

Como se nota en la tabla 1-3, la ponderación de cada colegio es el siguiente:

- Escuela Nieves del Sur: 136 pts.
- Escuela Baquedano: 142 pts.
- Liceo Josefina Aguirre Montenegro: 153 pts.
- Liceo Bicentenario Altos del Mackay: 163 pts.

Por todo esto, se determina que el Liceo Bicentenario Altos del Mackay será beneficiario del proyecto para un sistema de calefacción por geotermia con los fondos FIC.

Finalmente, el CEGA deriva las ejecuciones del proyecto en 2 partes importantes donde subcontrata a 2 empresas distintas para cada parte. En primera instancia la realización del pozo se hace por parte de una pequeña empresa llamada *Pozos Profundos Patagonia*, a cargo de Carlos Scheihing, quien además de realizar las perforaciones, instaló la bomba del pozo y las tuberías que llegan hasta la sala técnica y las del pozo de retorno hacia la napa de agua nuevamente. Por otra parte, la empresa encargada de la instalación de equipos Fan coil y la sala técnica se llama *Geomarket*, además también encargada de la ejecución de las redes de agua y de toda la aislación de estas.

### **1.3 CONDICIONES TÉCNICAS**

Como se ha mencionado anteriormente, el lugar del colegio queda ubicado en la ciudad de Coyhaique región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Es necesario analizar este punto para entender la geología y clima típicos del lugar, con el fin de poder adecuar el sistema a las condiciones que se presentan en el colegio. También hace parte importante analizar las características técnicas de la infraestructura para ver las condiciones en las que se ubican los alumnos y profesores.



Figura 1-3 Liceo Bicentenario Altos del Mackay

Fuente: Propia

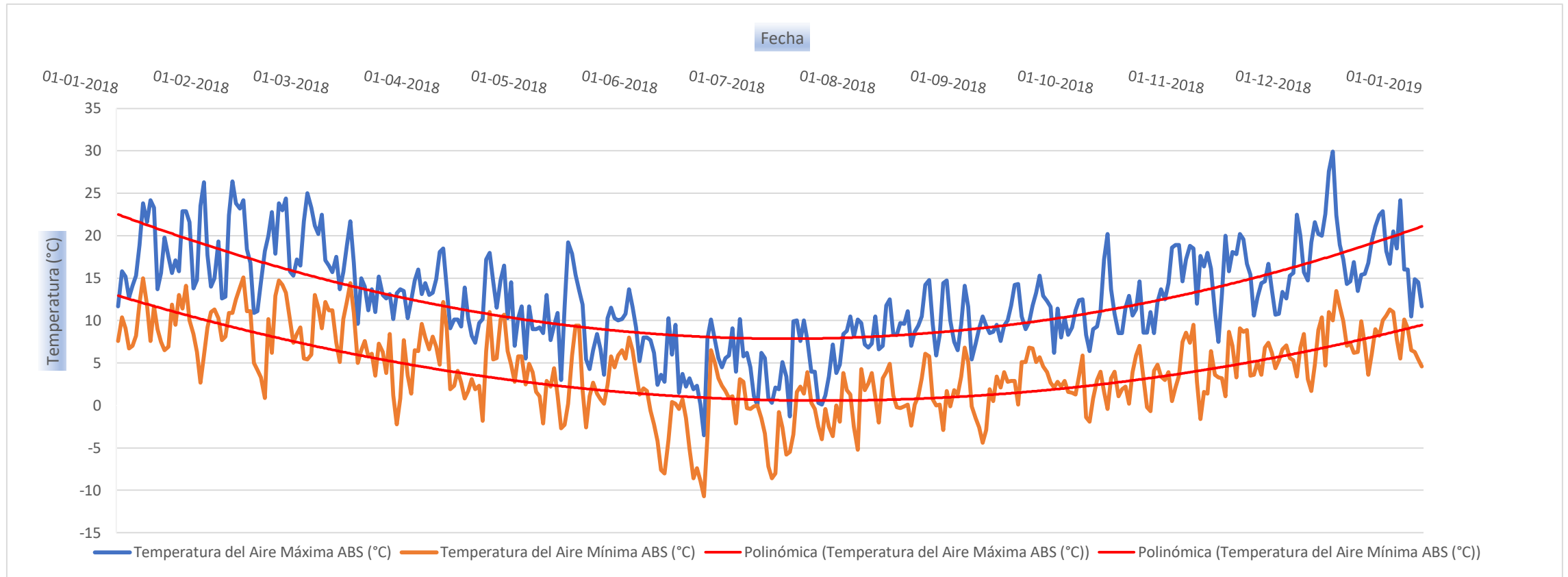
### 1.3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Es importante el estudio de las propiedades atmosféricas del lugar, con el fin de determinar las pérdidas energéticas que puede presentar el sistema durante el transcurso del año y la influencia de estos fenómenos frente al rendimiento de los equipos. La norma chilena Nch 1079-2008 clasifica las distintas zonas del país según su clima en nueve categorías distintas.



Figura 1-4 Mapa de climatización según Nch 1079-2008  
Fuente: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social

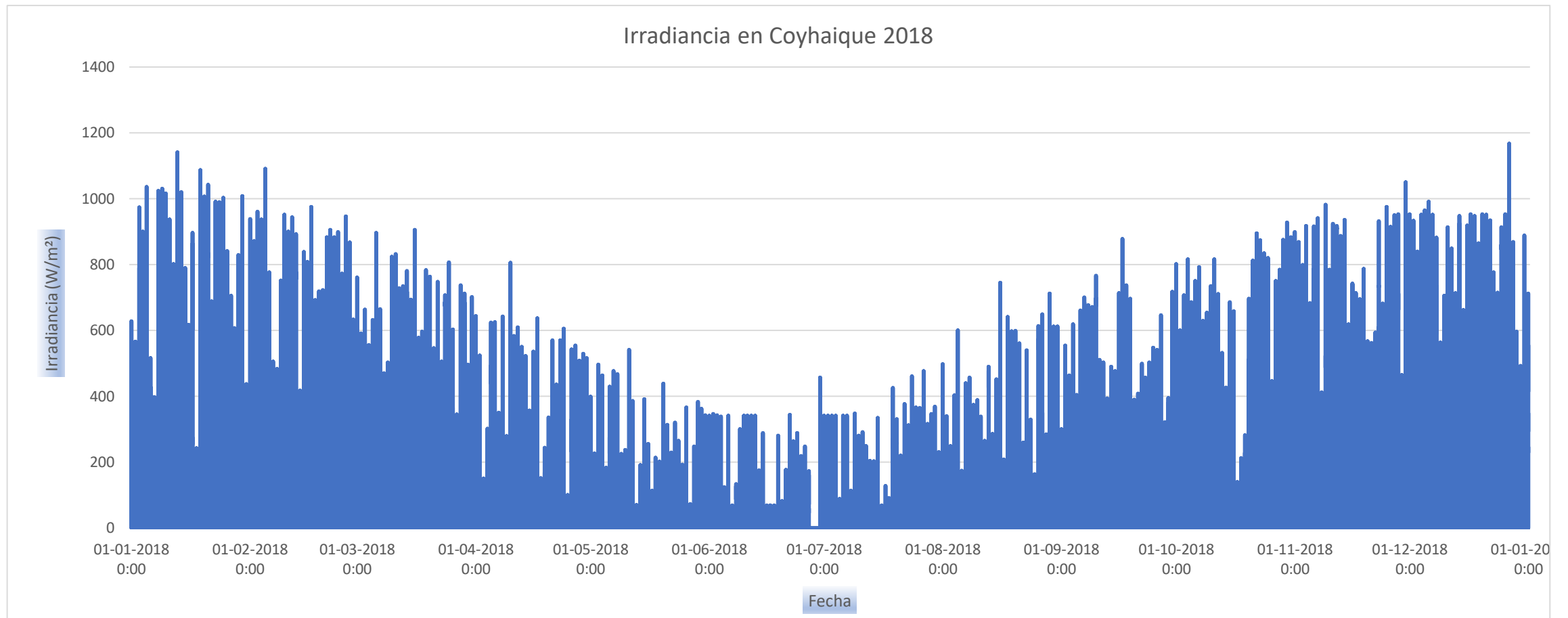
Coyhaique, ubicada en la región de Aysén, se encuentra en la octava clasificación del mapa en la zona denominada *Sur Extremo*, zona caracterizada por ser muy fría y lluviosa, donde las precipitaciones se presentan a lo largo de todo el año. Tiene una nubosidad casi permanente y los veranos suelen ser cortos presentando microclimas. Es debido a este clima que se puede generar una tendencia hacia enfocar el clima con temperaturas más heladas respecto a otras zonas de nuestro país. El comportamiento de la temperatura en esta zona durante el año 2018 se puede ver en la gráfica 1.



Gráfica 1-3 Temperaturas Ambiente Máximas y Mínimas en Coyhaique  
Fuente: Propia basada en Red Agrometeorológica de INIA estación El Claro

Basados en la gráfica anterior, se observa la tendencia general de la temperatura a decaer encontrando su punto de máximo decaimiento entre los meses de julio y agosto, con temperaturas que se encuentran entre los  $-5^{\circ}\text{C}$  y los  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Otro punto importante para analizar como factor climatológico es la condición de cuanta radiación es la que llega en esta zona, con el fin de analizar la pérdida o ganancia de calor que podemos obtener en las salas de clase consideradas para la calefacción.



Gráfica 1-4 Irradiancia en Coyhaique durante el año 2018  
Fuente: Propia basada en Red Agrometeorológica de INIA estación El Claro

En base a la gráfica 1-4 se logra apreciar la irradiancia a lo largo de todo el año 2018 en Coyhaique por cada hora transcurrida, donde además se nota la tendencia de generar una curva que decrece hasta los meses de Junio – Julio y vuelve a crecer para volver a completar el ciclo. Este comportamiento es relativamente periódico año a año, por lo que la demanda en esos períodos se puede considerar en esencia constante con el fin de poder proyectar el diseño para los siguientes años. Se ve que la Irradiancia en la época de Junio-Julio, prácticamente no sobrepasa los 400 W/m<sup>2</sup>.

Todo este estudio se hace con el objetivo de poder reducir la cantidad de contaminación que presenta la ciudad de Coyhaique ya que cada año llega a niveles alarmantes, por lo que este tipo de iniciativas van tomando poco a poco mayor peso debido a la demanda de la sociedad por vivir en ambientes libres de contaminación. La situación puntual que vive Coyhaique hoy en día es preocupante desde un enfoque medioambientalista en la calidad del aire, situación que ve la raíz de su problema en el tipo de calefacción que sus habitantes ocupan para el calentamiento de sus viviendas en la época de invierno, donde mayormente ocupan leña húmeda como fuente de calefacción. El decreto supremo N°59/1998 regula la norma vigente para material particulado en el aire de tamaño no mayor a 10 micrones (MP10), donde se especifica que el límite para material particulado respirable del percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas en un período de un año por cualquier estación de monitoreo pública no puede ser mayor o igual a 150 µg/m<sup>3</sup>. Consecutivamente en su artículo 3° especifica los rangos de niveles que originan situaciones de emergencia medioambiental por medio de Material Particulado MP10 para un período de 24 horas, que se ven en la tabla 1-4.

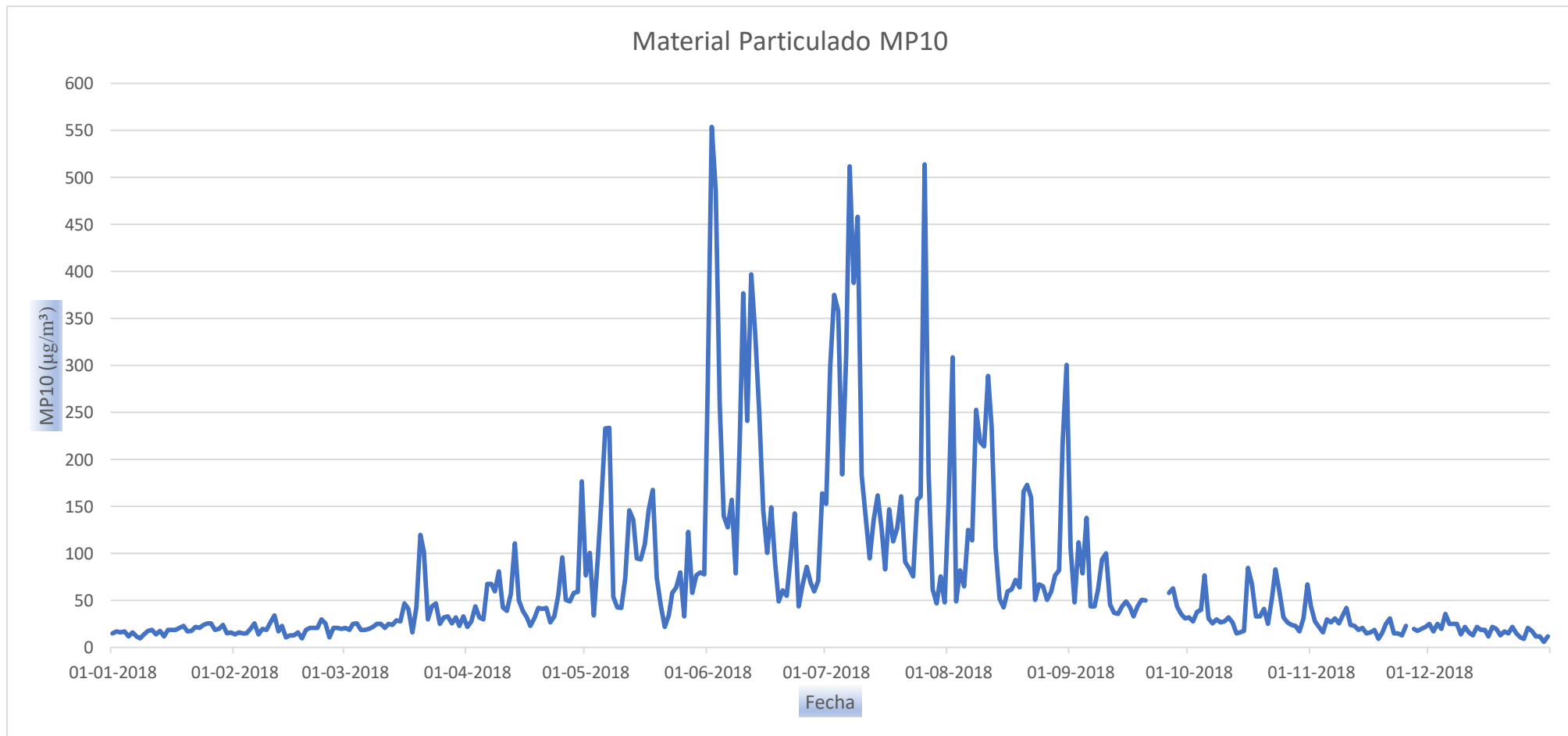
Tabla 1-4 Rango para niveles de emergencia medioambiental para MP10

Nivel	Material Particulado MP10 (µg/m <sup>3</sup> ) en 24 horas
Nivel 1°	195-239
Nivel 2°	240-329
Nivel 3°	330 o superior

Fuente: Biblioteca del del Congreso Nacional de Chile (BCN)

Además, se considerará sobrepasada la norma primaria anual cuando el promedio aritmético anual de la calidad del aire para material particulado respirable MP10 para 3 años consecutivos, por cualquier estación de monitoreo público, sea mayor o igual a 50 µg/m<sup>3</sup>.

Para comprobar estas regulaciones, se toman los datos monitorizados en la estación de Coyhaique para material particulado MP10 para todo el año 2018 que se muestran en la gráfica 1-5.



Gráfica 1-5 Material Particulado MP10 del año 2018  
Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)

La información que se puede extraer del gráfico es la siguiente:

- El total de datos registrados por todo el año es de  $n=359$
- El mínimo registrado en el año 2018 es de  $\text{min}=6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- El máximo registrado en el año 2018 es de  $\text{max}=554 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- La media aritmética anual del 2018 es de  $m=72.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- El percentil al 98% para  $n=359$  da como resultado  $x=375 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Como se logra apreciar la tendencia general es que para los meses de mayo hasta septiembre se denota un incremento en el MP10, como consecuencia de las bajas temperaturas al usar como fuente de calefacción madera húmeda y también a la creciente densidad poblacional. En primera instancia se hace evidente que tanto la media aritmética anual como el percentil al 98% y las máximas emisiones registradas durante todo el año superan a los valores propuestos por la norma, dejando a Coyhaique como una ciudad en estricto rigor contaminada, habiendo días que incluso se alcanzan situaciones de emergencia de nivel 3°, por lo que se ha hecho evidente buscar formas de combatir esta situación e ir reemplazando la fuente de calefacción típica de la zona como lo es la madera húmeda.

### **1.3.2 INFRAESTRUCTURA DEL EDIFICIO**

Dentro de las dependencias del colegio, se estableció sectores en específico para la propuesta de calefacción, y se revisaron los distintos componentes que constituyen tanto las paredes como la techumbre de cada sector en específico. Debido a que el colegio ha ido construyendo ampliaciones a medida que pasan los años, las paredes de cada sector difieren una de otras por lo que se debe hacer un análisis individual por cada uno de ellos. A continuación, en la figura 1-7, se muestra una sección del plano del Liceo, sección que se planes intervenir para el proyecto. El primer pabellón que se interviene será el de color verde (Pabellón 1), también el pabellón de color amarillo (Pabellón 2), y el último sector a intervenir será el de color rojo (Pabellón 3), dejando el cuarto de color celeste de nombre BOD como sala técnica donde se instalarán las bombas de calor, bombas de circulación, etc. Desde esta última sala es de donde saldrán las tuberías a las distintas secciones del liceo para realizar las redes de agua para cada fan coil.

Si bien hay distintas características constructivas, hay puntos en común para cada pabellón, donde en todas las ventanas corresponden a termo paneles de doble vidriado con marco de aluminio, además de que toda la techumbre estructuralmente está sujeta por perfiles en C de acero galvanizado recubiertas con planchas de yeso cartón para cerrar el entretecho, teniendo una recubierta de lana mineral entre perfiles de 50 mm de espesor para el pabellón 2 y de 100 mm para los pabellones 1 y 3.

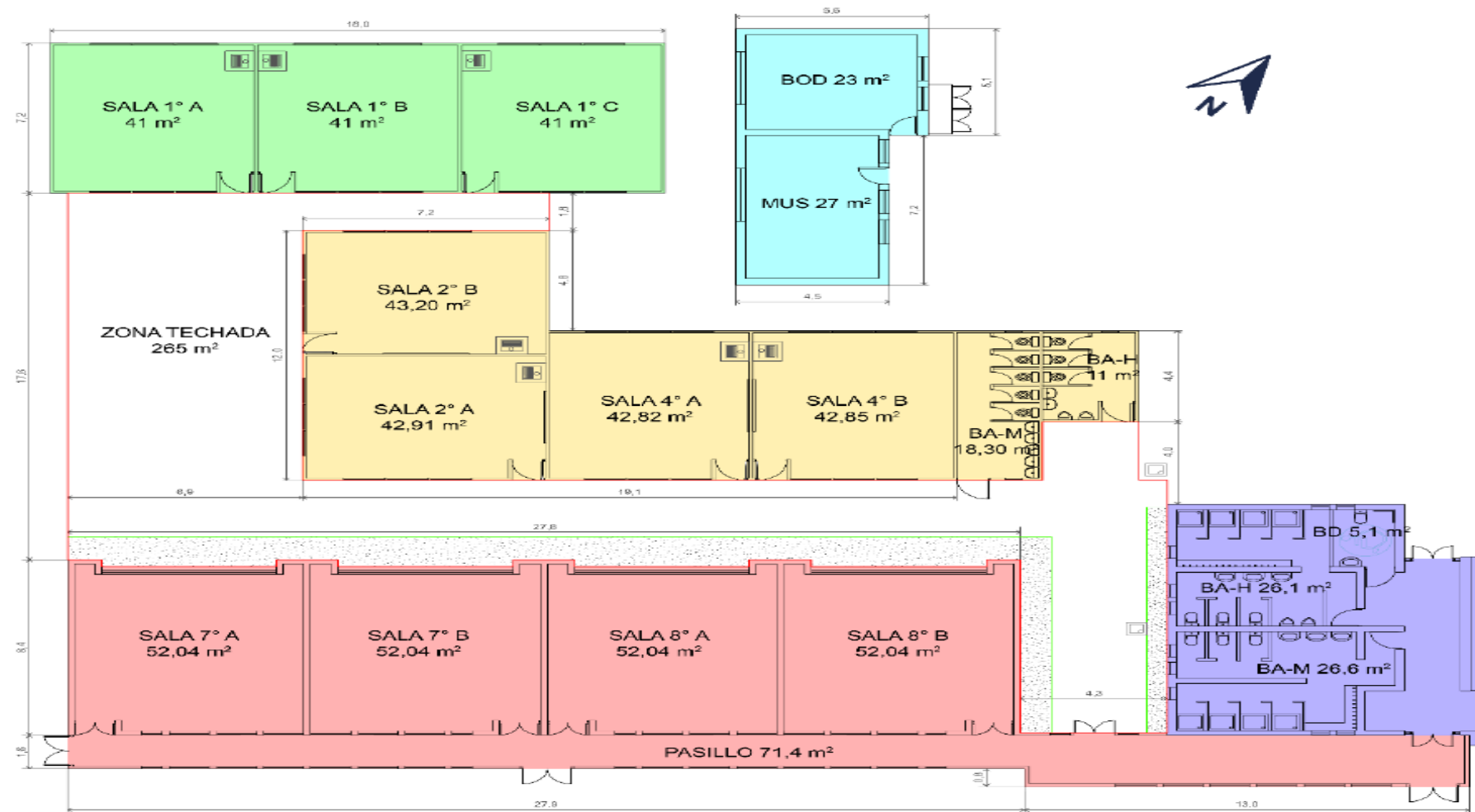


Figura 1-5 Sección del plano Liceo Altos del Mackay para los sectores de intervención del proyecto  
Fuente: CEGA

Para el caso del pabellón 1 (verde) se compone de 3 salas con 41 m<sup>2</sup> cada uno, dando un total de 123 m<sup>2</sup>. Sus muros se componen de tabique con una estructura de perfiles en C de acero galvanizado, pero recubierto interiormente por planchas de terciado ranurado de 9 mm, mientras que el exterior se conforma por placas de OSB de 18 mm y fibrocemento de 6 mm, por último, la aislación térmica de los muros es a través de lana de vidrio de 100 mm de espesor entre perfiles.

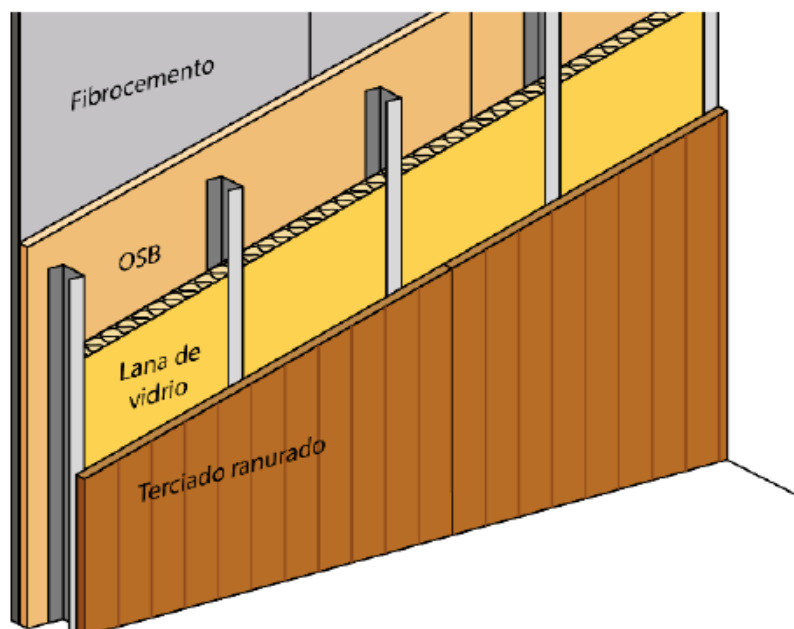


Figura 1-6 Conformación de Muros en Pabellón 1  
Fuente: CEGA

En este pabellón las puertas de acceso son de interior, mostrando tener un nivel de aislación que no concuerda con la misma eficiencia respecto al muro en donde se encuentra embutido, comprobándolo en la siguiente foto que se tomó con una cámara termográfica viendo la relación que hay entre pérdidas en la pared versus las pérdidas en las puertas y ventanas.



Figura 1-7 Fotografía de cámara termográfica en puertas y ventanas pabellón 1  
Fuente: CEGA

Para el caso del pabellón 2, se conforma con una infraestructura de 4 salas unidas junto a 2 baños en un extremo. Cada sala tiene una superficie de un área bastante similar, a diferencia de los baños donde se ve que uno es más grande que el otro. El total de esta infraestructura suma 201 m<sup>2</sup> aproximadamente, donde al mismo tiempo se encuentra separadas del edificio principal donde se encuentra el pabellón 3, por una superficie techada que cubre unos 265 m<sup>2</sup> respecto al pasillo y un patio.



Figura 1-8 Fotografía del Pabellón 2  
Fuente: Propia

La estructura de estas paredes está conformada por los llamados paneles SIP (Structural Insulated Panel), conectados entre ellos por vigas de madera de 65x65 mm, cubriendo un 5% del total de la pared. A su vez, estos mismos paneles se conforman dentro

de su espesor en primera instancia por planchas de OSB de 12 mm, seguido de bloques de poliestireno extruido de 65 mm y finalmente planchas de terciado ranurado de 9 mm.

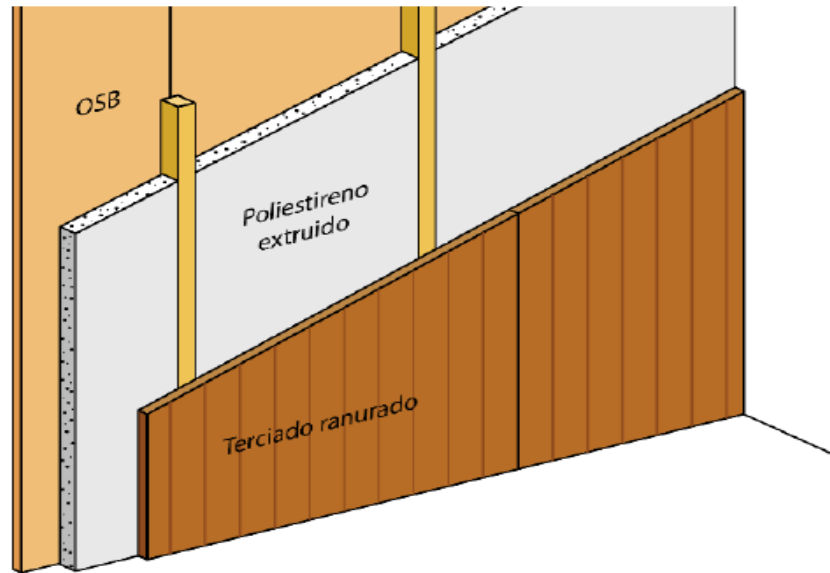


Figura 1-9 Conformación de muros del Pabellón 2

Fuente: CEGA

En el pabellón 2, las ventanas corresponden a termo paneles de doble vidriado como se mencionó anteriormente. Por otro lado, se repite el mismo ejercicio para la medición de puertas, que corresponden a puertas de interior donde se generan saltos térmicos entre estas mismas y las paredes como se observa en la figura 1-12.

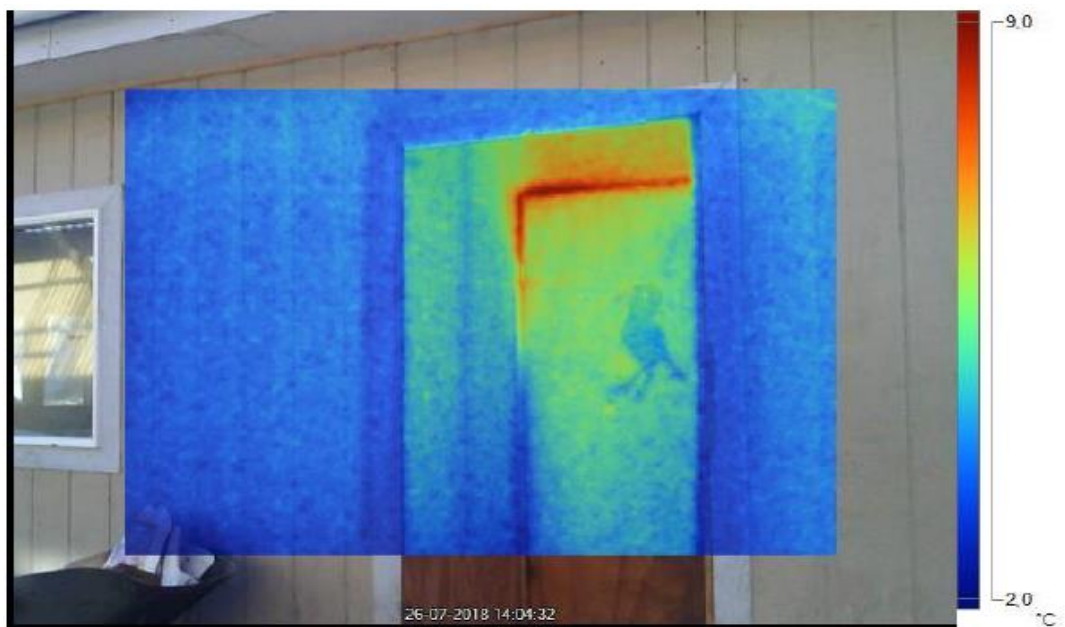


Figura 1-10 Fotografía de cámara termográfica en puerta de pabellón 2

Fuente: CEGA

Por último, el pabellón 3 se encuentra ubicado en el ala sur oeste del liceo, construido como primera ampliación del Liceo, que se conforma por 4 salas y un pasillo cerrado. Cada sala tiene unos 52 m<sup>2</sup>, mientras que el pasillo tiene 72 m<sup>2</sup>, dando un total de 280 m<sup>2</sup> para todo el sector a intervenir.



Figura 1-11 Sala de clases de Pabellón 3  
Fuente: Propia

La infraestructura cuenta en su totalidad por muros de tabique de 2,7 m de alto, con estructuras de perfiles en C de acero galvanizado con un ancho de 100 mm, un largo de la pestaña de 40 mm con un espesor de 1,6 mm. El muro está recubierto por planchas de yeso cartón de 15 mm de espesor, por el exterior está conformado por placas de OSB de 12 mm y fibrocemento de 6 mm. Como aislación principal, cuenta con lana mineral entre los perfiles de 100 mm de espesor.

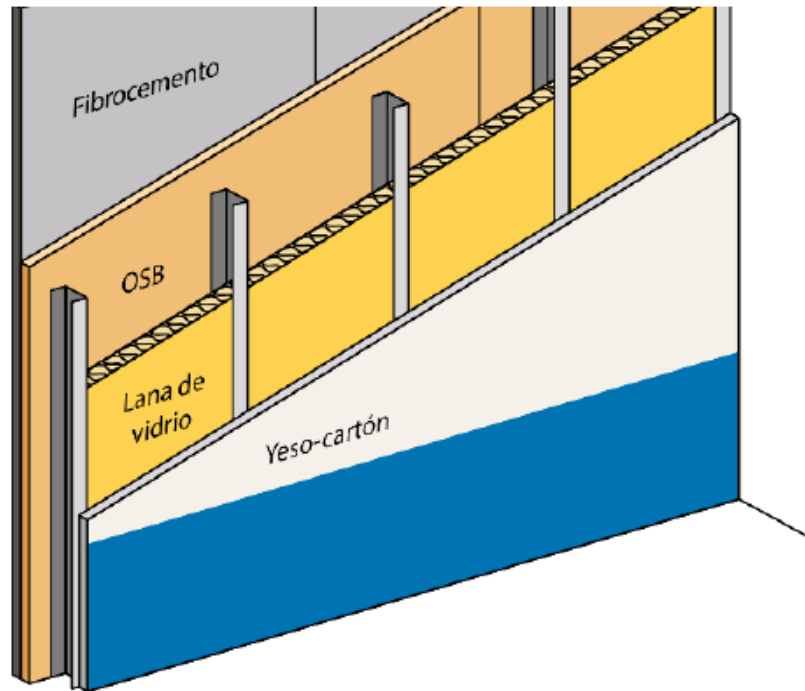


Figura 1-12 Conformación de muros del pabellón 3

Fuente: CEGA

### **1.3.3 CONDICIONES GEOLÓGICAS**

Para el desarrollo en la fase inicial del proyecto, y la sustentabilidad de que efectivamente se pudiera usar geotermia como fuente de energía para la calefacción, se debieron hacer estudios del subsuelo perteneciente al terreno dentro de las dependencias del Liceo, con el fin de verificar las capas de minerales que se pudieran encontrar y así poder determinar que tipo de colector es la opción más viable y económica para la ejecución del proyecto.

Dentro de las propiedades físicas que se pueden medir como medida geofísica de referencia, una de las más útiles para el estudio del subsuelo es la resistividad eléctrica, la que permite diferenciar suelo o rellenos sedimentarios de las rocas, y zonas de sedimentos secos versus sedimentos saturados de agua. La elección del tipo de colector es fundamental para dimensionar cuanta energía se puede extraer y con qué costos asociados, por lo tanto, es imperante buscar la existencia y profundidad de la napa freática de agua como también del basamento rocoso en el que se deposita los sedimentos saturados de agua.

Se implementaron 2 metodologías distintas para la medición de la resistividad eléctrica, la ERT (Tomografía de resistividad eléctrica) y la TEM (Transiente electromagnético), que tienen profundidades de observación entre 5 y 40 m, y entre 20 y 120 m respectivamente. Además de esta diferencia, la resolución a la que son capaces de observar estas metodologías son dispares, por lo que cuerpos más pequeños fuera del límite de observación serán promediados con el medio que los rodea, sin permitir la diferenciación entre estas y el entorno. Para el caso del ERT, la resolución es métrica (entre 2-5 m) y en el caso del TEM la resolución es decamétrica (10-30 m). Dadas estas

capacidades de observación, el ERT se usará para definir la existencia de una napa freática, y por otro lado el TEM se usará para definir la existencia de un basamento rocoso.

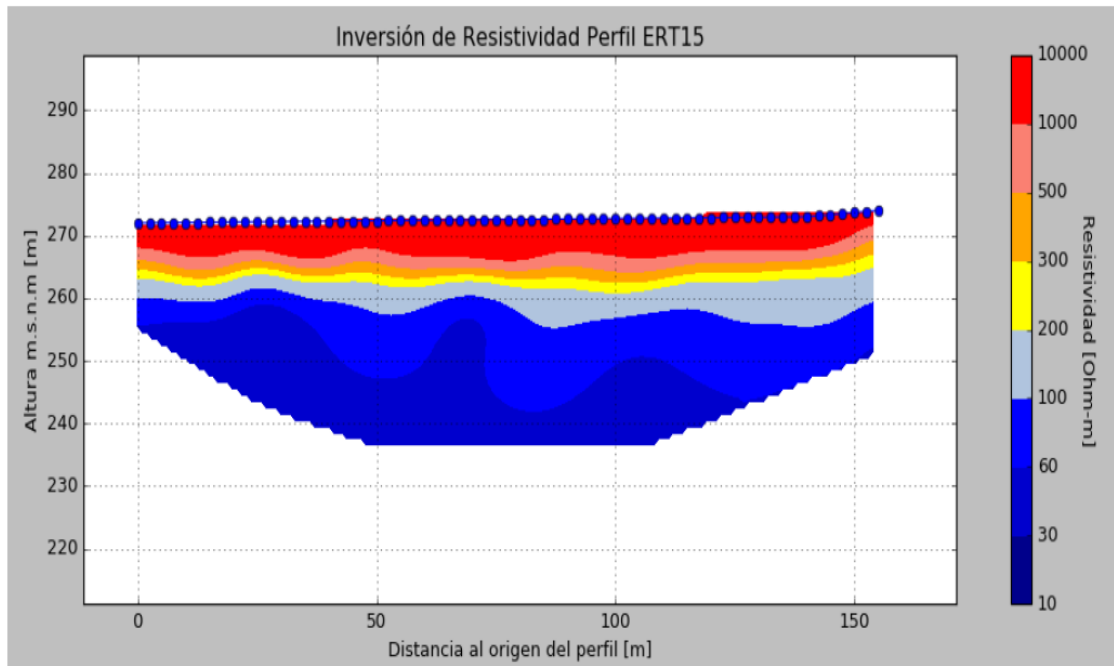


Figura 1-13 Medición de Resistividad dentro del Liceo (ERT)

Fuente: CEGA

Se logra apreciar en el ERT15 la resistividad que debería tener la napa freática de agua, donde cabe destacar que, gracias a la existencia del río Claro próximo a las cercanías del colegio, esta napa se encuentra a unos 10 m horizontales y a 3 m verticales del mismo, por lo que el río se encuentra sobre la napa de agua, implicando que éste carga de agua el acuífero.

Es muy probable la existencia de la napa freática bajo el Liceo Bicentenario Altos del Mackay, donde se muestra en el ERT15 que la napa se encontraría a unos 260 m.s.n.m., es decir a unos 15 m de profundidad, indicando que el recurso a explotar se encuentra en niveles aceptables para el diseño de colectores abiertos.

En base a esto último, y a los costos asociados a cada tipo de colector en particular para la extracción de energía, se estima que el mejor diseño para la ejecución del proyecto sea a través de un colector abierto, es decir, extraer directamente el agua del acuífero para que primero pase por un intercambiador de calor y posteriormente reinyectar el agua hasta el mismo acuífero.

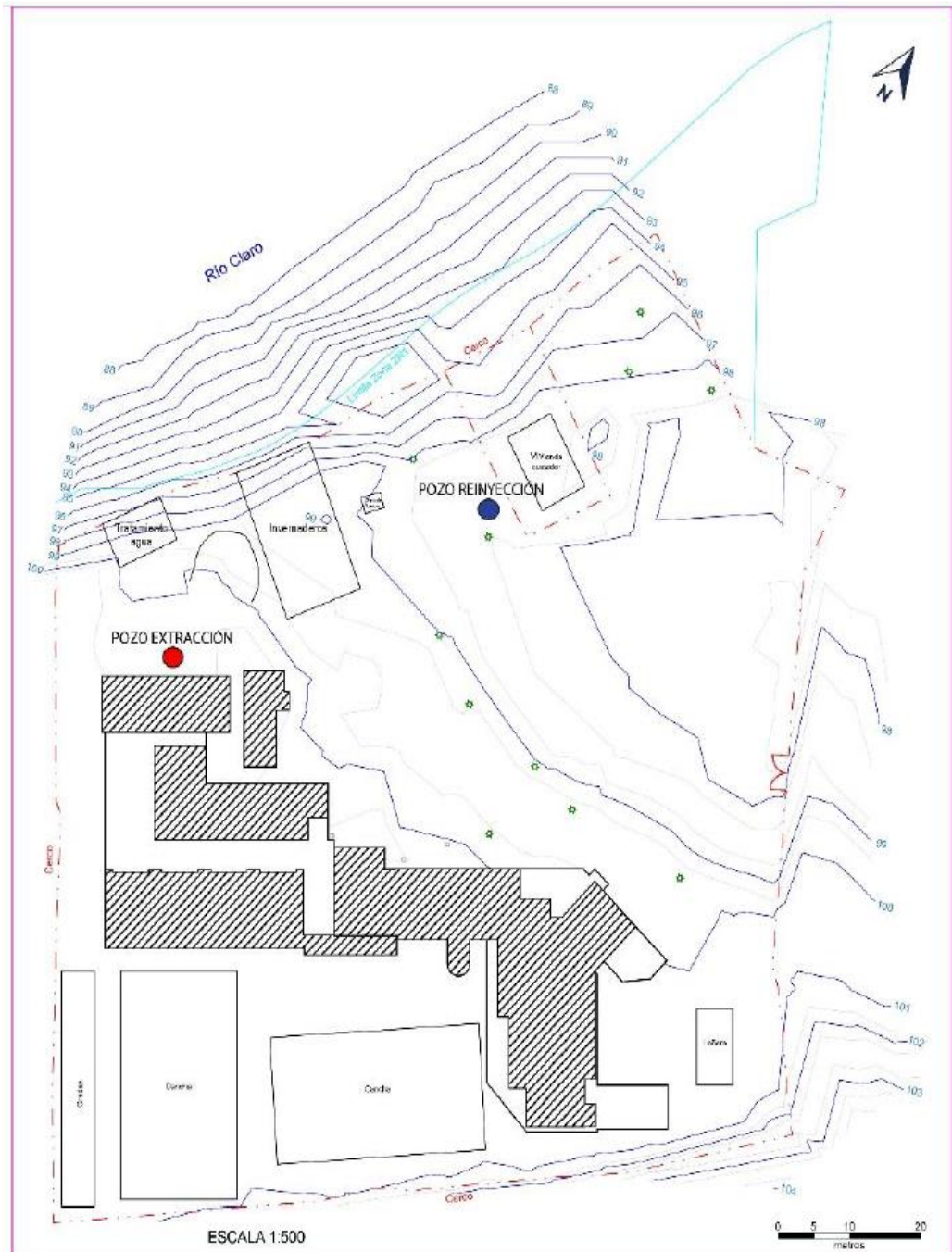


Figura 1-14 Puntos para los Pozos de Extracción y Reinyección dentro del Liceo Bicentenario Altos del Mackay (Punto Rojo Pozo de Extracción – Punto Azul Pozo de Reinyección)

Fuente: CEGA

Para el pozo de extracción, se estiman necesario que la profundidad sea de aproximadamente 35 m y 8 pulgadas de diámetro, por otro lado, para el pozo de reinyección, se consideran 24 m de profundidad y 6 pulgadas de diámetro. Las profundidades de los pozos fueron planeadas para extraer el caudal necesario en base a la demanda térmica que requiere el establecimiento.

Por último, para determinar la cantidad de agua disponible a ser utilizada en el sistema geotérmico, se realizaron pruebas de bombeo donde se verificó la capacidad del acuífero para abastecer 8 l/s en función de la profundidad en la que se encontraba.



Figura 1-15 Pruebas de bombeo del pozo de extracción en Liceo Bicentenario Altos del Mackay  
Fuente: CEGA

Tabla 1-5 Medición del Caudal a distintas profundidades

<b>Prueba de gasto variable</b>		
<b>Nivel dinámico (m)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Caudal (lts/seg)</b>
9	5	1
9,2	10	1
9,2	15	1
9,2	20	1
9,2	25	1
9,2	30	6
9,3	35	6
9,6	40	6
9,6	45	6
9,6	50	6
10,1	55	8
10,7	60	8
10,8	65	8
10,8	70	8
10,8	75	8
11,6	80	10
12	85	10
12,2	90	10
12,2	95	10
12,2	100	10
14,5	130	14
14,6	135	14
14,8	140	14
14,8	145	14
14,8	150	14
20	155	20
21	160	20
21,2	165	20
21,1	170	20
21	175	20

Fuente: CEGA

Con las mediciones obtenidas de la prueba, se verifica que efectivamente el pozo cumple con el caudal mínimo requerido para obtener la energía necesaria para la calefacción parcial del Liceo.

#### **1.4 PROBLEMÁTICA**

El trabajo propuesto tiene por objetivo presentar mejoras para el sistema de calefacción por geotermia, referente al proyecto donde se ejecutó. Con toda la información recabada se espera dar lugar a la justificación técnica del diseño al que actualmente se tiene implementado en el Liceo, y a partir de ese punto realizar las modificaciones que se estimen pertinentes, que sean técnicamente viables y económicamente competentes.

Se proponen como medidas para mejorar el rendimiento del sistema las siguientes opciones:

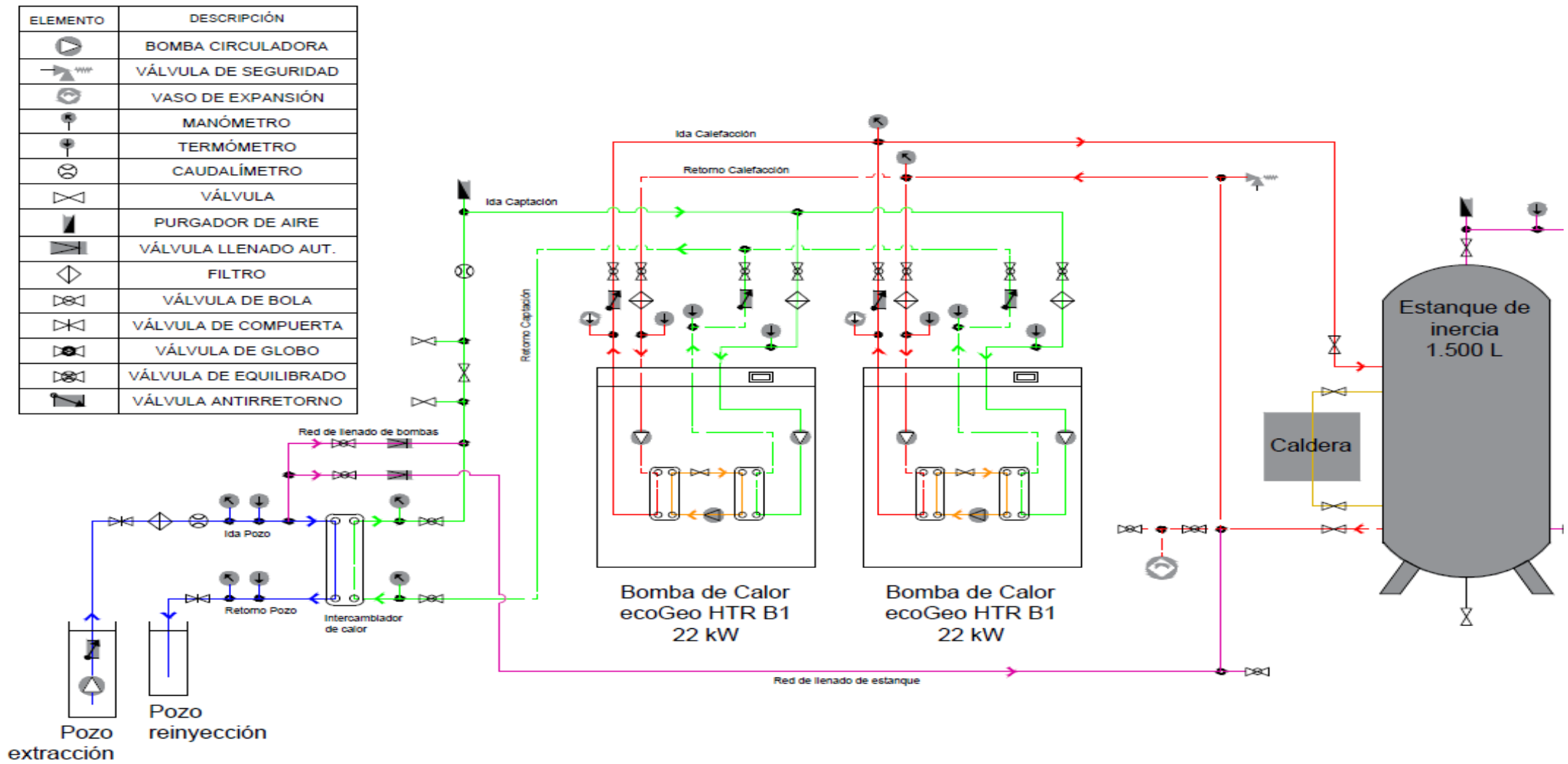
- Mejorar la aislación de la infraestructura en los edificios según estándares: Se evaluará la calidad de la aislación que actualmente poseen los edificios que se climatizaron, así como la eficiencia que repercute en el sistema, la inversión que se debe realizar y las ventajas en los costos que implican dicha inversión.
- Instalación de recuperadores de calor: Se evaluará la eficiencia en costos y rendimiento de mejoría para el sistema en la instalación de recuperadores de calor. Se evaluará los costos para la instalación en todas las salas, la mejoría en rendimiento de los componentes, y el impacto que tiene sobre los costos para el funcionamiento de del sistema.



## **CAPÍTULO 2 DISEÑO DEL SISTEMA**

## **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA**

El objetivo del proyecto es la calefacción de las 11 salas, 2 baños y un pasillo ya mencionados en los distintos pabellones del Liceo, por medio del uso de la geotermia como fuente de calor. El sistema consta en la instalación de 13 Fan coils y 2 radiadores como equipos encargados de la generación de calor dentro de los lugares contemplados para la calefacción. La generación de calor viene dada por un sistema por bomba de calor, estanque acumulador, bombas de circulación y un intercambiador de calor entre el agua del pozo y el agua de captación de calor que llega a la bomba de calor. El proceso comienza cuando el agua del pozo se extrae y pasa por el intercambiador de calor, donde el agua que viene desde la bomba de calor por el sistema de captación logra recuperar unos cuantos grados Celsius desde el agua que viene del pozo, donde a su vez el sistema de captación pasa nuevamente por otro intercambiador de calor interno que posee la bomba de calor, donde el calor pasa esta vez al líquido refrigerante de la bomba de calor. El líquido refrigerante, sigue un ciclo termodinámico donde se aumenta la energía interna y por consiguiente su temperatura, temperatura de operación suficiente para lograr calentar el agua de producción del sistema en el centro condensador de la bomba de calor. El agua de producción calentada es almacenada en un estanque de 2.000 l con el fin de poder ocuparla en cualquier momento que se requiera cuando se utilice el equipo de calefacción, impulsando el agua con bombas de circulación que tendrán la señal de activación dada por termostatos ubicados en cada salón y conectados en paralelo por cada pabellón que se conectan hasta un contactor que activará la respectiva bomba.



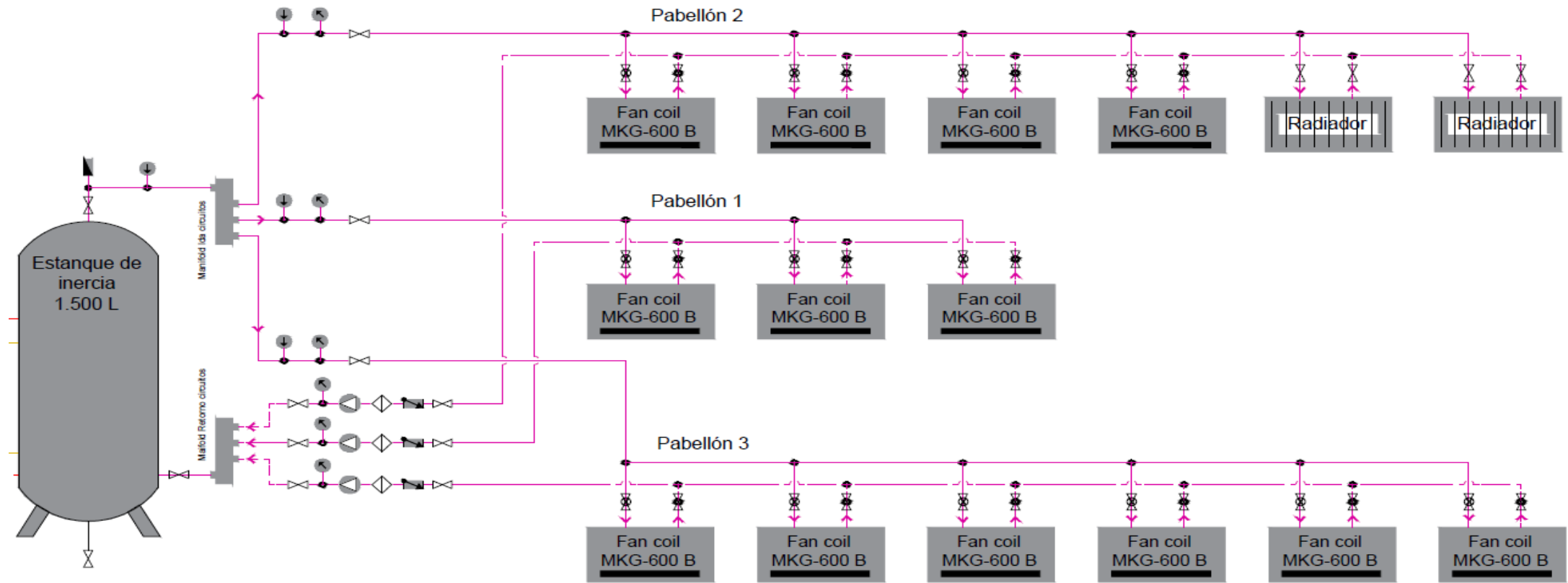


Figura 2-1 Esquema hidráulico para la instalación del proyecto

Fuente: CEGA

## 2.2 DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR

La bomba de calor es un equipo que nos permite aprovechar la energía almacenada en el subsuelo en forma de calor para usarla en tecnologías de climatización o incluso para calentar Agua Caliente Sanitaria (ACS). El funcionamiento de esta máquina radica en los componentes que se usan para completar el ciclo de refrigeración, con el fin de transportar calor desde el lado de baja temperatura hacia el lado de alta temperatura.

Los componentes principales dentro de la bomba de calor son las siguientes:

- Centro Evaporador
- Compresor
- Centro Condensador
- Válvula de Expansión

Estos componentes interactúan por medio de un líquido refrigerante, que es un líquido que tiene la característica de que alcanza su punto de ebullición a muy bajas temperaturas, cumpliendo el objetivo de transportar calor desde un foco frío de temperatura hacia uno más caliente.

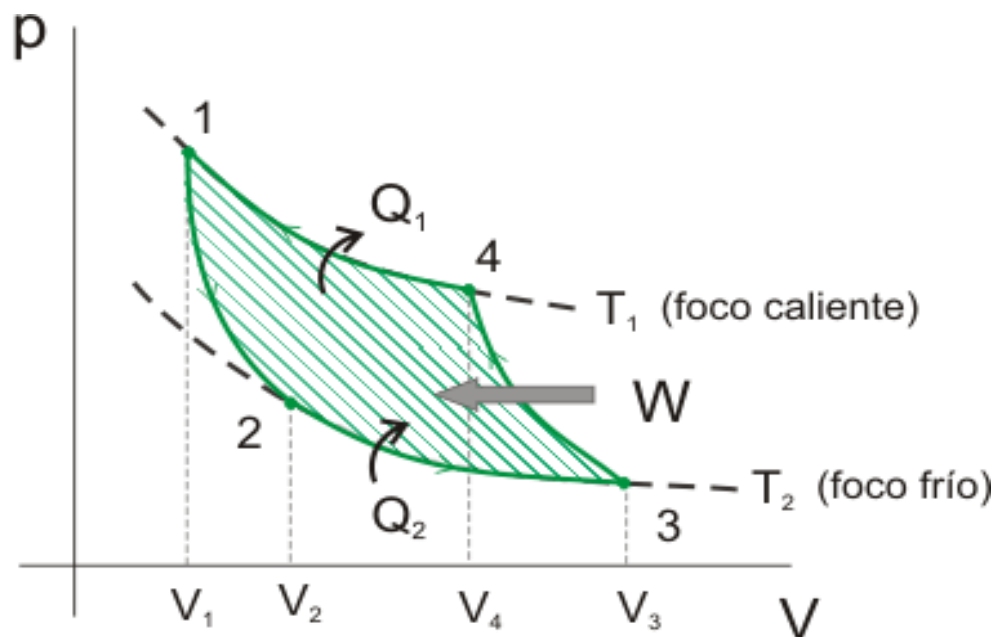


Figura 2-2 Ciclo de Carnot Inverso  
Fuente: Google Imágenes

El ciclo de Carnot Inverso muestra el comportamiento de las variables Presión-Volumen en la figura 2-2, donde se logra apreciar paso a paso el ciclo ideal por el que el líquido refrigerante es sometido. Cabe destacar que el ciclo de Carnot al ser ideal representa teóricamente la máxima eficiencia que se puede lograr con una máquina

térmica, misma que no es posible recrear en la realidad, debido a distintos procesos irreversibles que suceden durante el funcionamiento de los componentes.

El proceso se compone principalmente de 4 pasos, donde en primera instancia el proceso se mueve del estado 1-2, donde nuestro líquido pasa de un estado de alta presión y temperatura a uno de baja debido a la acción de la válvula de expansión (Proceso adiabático) donde se convierte en líquido saturado, posteriormente el líquido pasa al centro evaporador donde se obtiene calor del medio de baja temperatura (pozos de agua, aire, tierra) y que convierte al líquido en vapor saturado pasando del estado 2-3 (Proceso Isotérmico). A partir del estado 3 el vapor saturado entra en el compresor donde se realiza un trabajo mecánico sobre éste y que termina aumentando su temperatura varios grados por encima del punto de ebullición convirtiéndose en vapor sobrecalentado pasando del estado 3-4, y por último el vapor pasa por un centro condensador que termina cediendo calor hacia el medio de alta temperatura pasando nuevamente a convertirse en líquido saturado pasando del estado 4-1 donde nuevamente pasará a la válvula de expansión a repetir el ciclo.

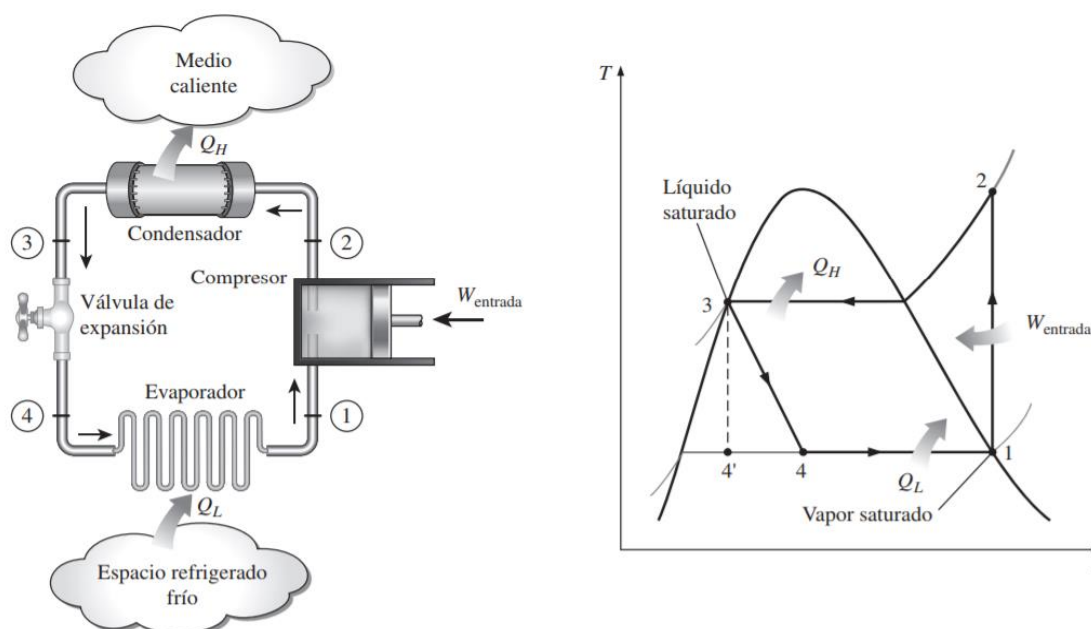


Figura 2-3 Diagrama Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor  
Fuente: Termodinámica Cengel 7ª Edición

En la figura 2-3 se aprecia un esquema con los componentes del ciclo de refrigeración y la dirección del flujo que sufre el líquido refrigerante, y a su vez se muestra el comportamiento de este en un diagrama Temperatura-Entropía (T-S) en un ciclo ideal. No obstante, en un ciclo real de refrigeración ocurren irreversibilidades que terminan por cambiar la forma del ciclo, donde las fuentes de estas irreversibilidades más comunes son la fricción del fluido (pérdidas de carga) y el intercambio de calor con el ambiente, valores que pueden influir notablemente en el diseño interno de los componentes. Es muy difícil controlar la exactitud de las magnitudes de nuestro refrigerante para obtener por ejemplo

vapor saturado una vez haya pasado nuestro líquido por el evaporador, pero es mucho más sencillo generar un ligero sobrecalentamiento para asegurar así que todo el líquido efectivamente se convierta en vapor para entrar en el compresor, pero al mismo tiempo eso incrementa el volumen específico de nuestro vapor que es directamente proporcional al trabajo que debe realizar el compresor aumentando las características para aumentar la potencia, situaciones que deben considerarse para obtener el mejor desempeño posible. Un ciclo real de refrigeración se logra observar en la figura 2-4.

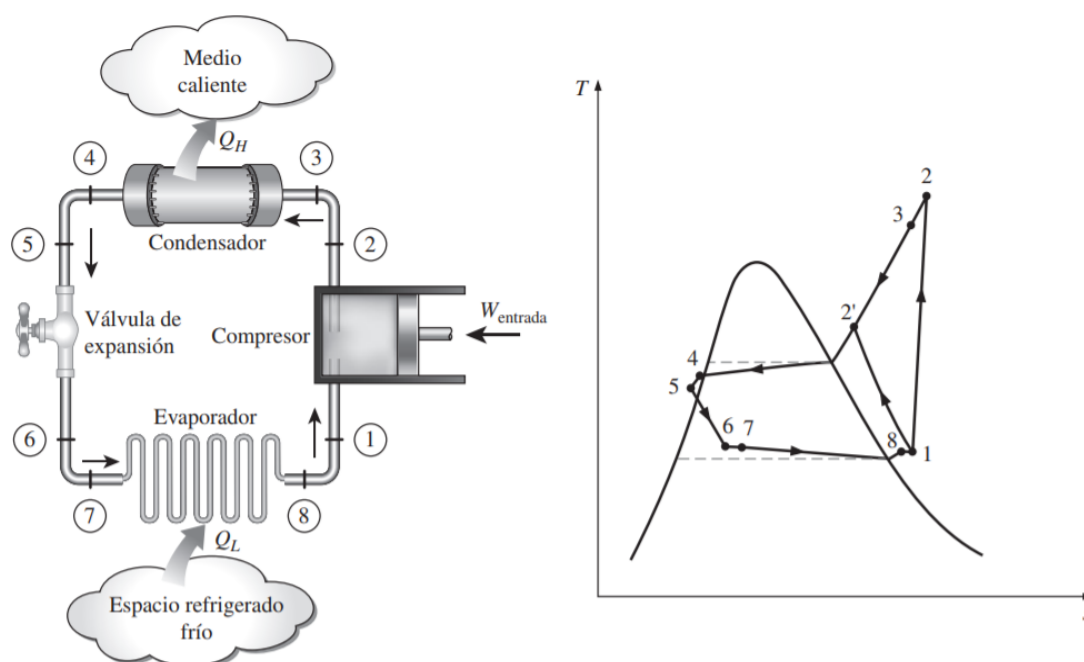


Figura 2-4 Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor  
Fuente: Termodinámica Cengel 7ª Edición

Es importante conocer la manera en que opera esta máquina con el fin de poder proyectar el consumo que se tendrá en función de la demanda, por lo que se hace evidente conocer de cuánta energía se requiere para calefaccionar las zonas implicadas en el proyecto. Desde este punto de vista, la norma chilena Nch 853 tiene como objetivo los cálculos a estimar para las resistencias y transmitancias térmicas por lo que se tomará dicha norma para establecer la demanda.

En primera instancia se debe establecer el balance energético que determina la cantidad de calor que aporta o quita energía a nuestro sistema. Los factores que influyen en la pérdida de calor corresponden a pérdidas que se encuentran en las paredes, techo, piso y a caudales de entrada de aire que puede tener la sala. El balance energético para una sala se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{met} + \dot{Q}_{cal} = \dot{Q}_{pared} + \dot{Q}_{ven} + \dot{Q}_{techo} + \dot{Q}_{piso} + \dot{Q}_{ren}$$

**$\dot{Q}_{sol}$** : Calor por radiación solar (W)

**$\dot{Q}_{met}$** : Calor por metabolismo de las personas (W)

**$\dot{Q}_{cal}$** : Calor por Calefacción (W)

**$\dot{Q}_{pared}$** : Calor por pérdidas en las paredes (W)

**$\dot{Q}_{ven}$** : Calor por pérdidas en las ventanas (W)

**$\dot{Q}_{techo}$** : Calor por pérdidas en el techo (W)

**$\dot{Q}_{piso}$** : Calor por pérdidas en el piso (W)

**$\dot{Q}_{ren}$** : Calor por renovaciones en caudal de aire (W)

Cada uno de estos valores representa la ganancia o pérdida de calor que se tiene en la sala, y para poder determinar cada uno de estos valores, la ecuación viene dada por:

$$\dot{Q} = U * A * (T_{int} - T_{ext})$$

**$\dot{Q}$** : Potencia Térmica en Calor (W)

**$U$** : Transmitancia Térmica (W/m<sup>2</sup>K)

**$A$** : Área (m<sup>2</sup>)

**$T_{int}$** : Temperatura al interior de la sala (°C)

**$T_{ext}$** : Temperatura al exterior o temperatura ambiente (°C)

A su vez, la transmitancia térmica depende del material al que se esté analizando y de la siguiente relación:

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

**$\lambda$** : Conductividad Térmica (W/mK)

**$e$** : Espesor del material (m)

El recíproco de esta relación se establece con la letra R y se denomina resistencia térmica, que es una manera más conveniente de verla debido a la facilidad de aprender la idea detrás de la ecuación, como la resistencia del paso del calor a través de los distintos materiales.

Debido a que las paredes de nuestros pabellones presentan composiciones distintas de distintos materiales, se debe analizar cada una por separado siguiendo los criterios de la norma.

La norma establece la siguiente ecuación para el cálculo de la resistencia térmica de elementos compuestos en las paredes de la sala:

$$R_t = \frac{1}{U_t} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}$$

$R_t$  = Resistencia térmica total ( $m^2K/W$ )

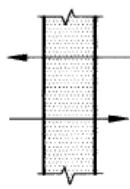

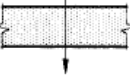
$R_{si}$  = Resistencia superficial interna ( $m^2K/W$ )

$R_{se}$  = Resistencia superficial externa ( $m^2K/W$ )

$U_t$  = Transmitancia térmica total ( $W/m^2K$ )

Los valores  $R_{si}$  y  $R_{se}$  vienen dados en la tabla 2-1. Además, se muestran los valores para la conductividad térmica de diversos materiales de construcción, siendo éstos los que se ocupan para el dimensionamiento según la Nch 853 en la tabla 2-2.

Tabla 2-1 Resistencias térmicas de superficie para distintos sentidos de flujo

Resistencias térmicas de superficie en $m^2 \times K/W$							
Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		$R_{si}$	$R_{se}$	$R_{si} + R_{se}$	$R_{si}$	$R_{se}$	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que $60^\circ$ respecto a la horizontal		0,12	0,05	0,17	0,12	0,12	0,24
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que $60^\circ$ respecto a la horizontal		0,09	0,05	0,14	0,10	0,10	0,20
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que $60^\circ$ respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Fuente: Norma Chilena 853

Tabla 2-2 Extracto Conductividades térmicas para distintos materiales

Elemento	Conductividad térmica ( $W/mK$ )
Fibrocemento	0,22
Lana Mineral	0,042
Madera	0,1
OSB	0,23
Terciado	0,102
Yeso Cartón	0,24
Poliestireno	0,043
Vidrio	0,24

Fuente: Norma Chilena 853

Los materiales y espesores de cada uno de los materiales se encuentran especificados en el capítulo anterior para cada uno de los pabellones (ver el punto 1.3.2). Los valores para las resistencias superficiales para este caso son de  $R_{si}=0,12$  y  $R_{se}=0,05$  debido al flujo de calor horizontal y que las paredes se encuentran de separación hacia el exterior.

Para el caso del pabellón 2, se denota que tiene perfiles de madera a lo largo de sus paredes (ver figura 1-11), por lo que la transmitancia térmica que ocurre por los perfiles no es la misma transmitancia que ocurre entre los perfiles, es debido a esto que la norma regula esto en función de la siguiente expresión como promedio en función de cada área de cada una de las transmitancias:

$$\bar{U} = \frac{1}{R_t} = \frac{\sum U_i * A_i}{\sum A_i}$$

$\bar{U}$ : *Transmitancia Promedio (W/m<sup>2</sup>K)*

$A_i$ : *Área de la Transmitancia (m<sup>2</sup>)*

$U_i$ : *Transmitancia individual (W/m<sup>2</sup>K)*

Para el caso de nuestras ventanas, nos encontramos con termopanales de doble vidriado, es decir con 2 capas de vidrio que en su interior contiene una cámara de aire. En este caso es importante entender la naturaleza de la transferencia de calor, y el cambio que sufre al pasar por una cámara de aire y las pérdidas asociadas a dicho estado. La norma chilena 853 clasifica los distintos tipos de cámaras de aire según la renovación por caudal de aire que tienen cada uno de éstos. La condición que deben cumplir las cámaras de aire para considerarlas como no ventiladas en flujos horizontales es la siguiente:

$$\frac{S}{A} < 3 \frac{cm^2}{m^2}$$

$S$  = *Sección total de rendijas u orificios por donde entra aire (cm<sup>2</sup>)*

$A$  = *Superficie de la cámara de aire (m<sup>2</sup>)*

Debido a que no hay orificios o rendijas por donde el aire pueda entrar al interior de la cámara la sección  $S = 0$ , tomando como conclusión que se cumple con la condición previa. Dado lo anterior, la expresión por la que se calcula la  $R_t$  para cámara de aire no ventiladas es la siguiente:

$$Rt = \frac{1}{U} = Rsi + Ri + Rg + Re + Rse$$

*Rsi = Resistencia superficial interna (m<sup>2</sup>K/W)*

*Ri = Resistencia interna (m<sup>2</sup>K/W)*

*Rg = Resistencia térmica de cámara de aire no ventilada (m<sup>2</sup>K/W)*

*Re = Resistencia externa (m<sup>2</sup>K/W)*

*Rse = Resistencia superficial externa (m<sup>2</sup>K/W)*

*Rt = Resistencia total (m<sup>2</sup>K/W)*

Los valores de Rsi y Rse se estiman de la misma manera que el método ya expuesto, y de la misma manera para los valores de Ri y Re, en cuanto al valor de la resistencia térmica de cámara de aire no ventilada la norma establece 4 casos generales distintos para determinar la resistencia de cualquier espesor en función de su emisividad total de la cámara E, dada la fórmula:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E1} + \frac{1}{E2}$$

- Caso general (materiales corrientes de construcción tales como madera, hormigón, ladrillos, vidrio, papeles no metálicos, etc.): E1 = E2 = 0,9 de donde E = 0,82
- Una de las superficies de la cámara es brillante, E1 = 0,2, la otra superficie, en cambio, corresponde a materiales corrientes de construcción, E2 = 0,9 de donde E=0,2.
- Ambas superficies de la cámara son brillantes, E1 = E2 = 0,2 de donde E = 0,11.
- Una de las superficies de la cámara es muy brillante, E1 = 0,05, la otra superficie en cambio, corresponde a materiales corrientes, E2 = 0,9 de donde E = 0,05.

Dada las consideraciones expuestas, nos encontramos en el primer caso, donde la emisividad total E = 0,82 se ocupa en el siguiente nomograma:

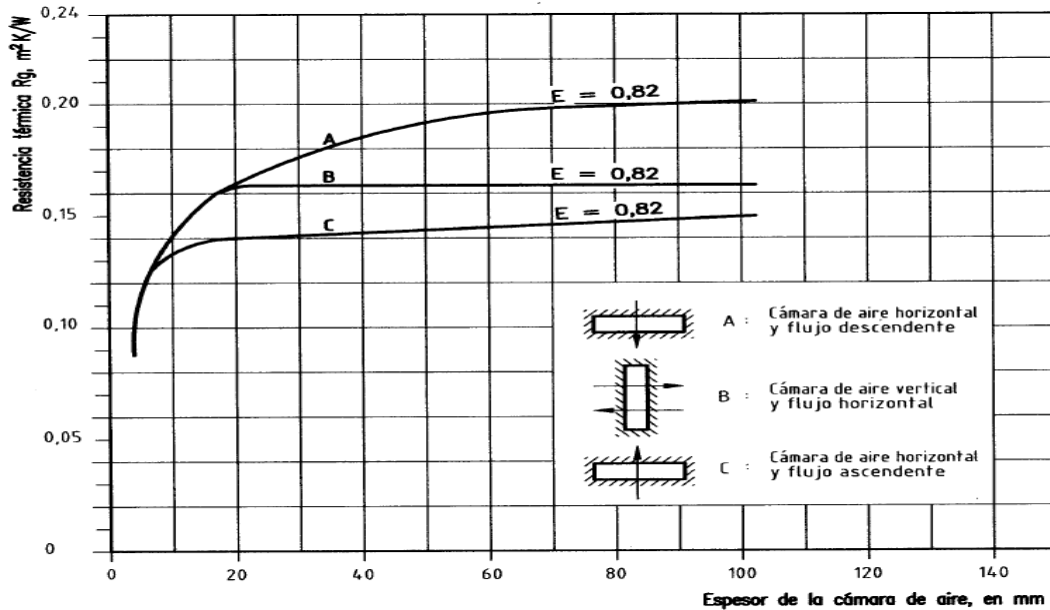


Figura 2-5 Nomograma para obtener Resistencia térmica para cámaras de aire no ventiladas  
Fuente: Norma Chilena 853

Como resultado en una cámara de espesor de 12 mm y un flujo horizontal que aparece en la elección B del nomograma, se obtiene una resistencia térmica  $R_g = 0,145$ , dando un total de  $R_t = 0,365$  ( $m^2K/W$ ). Finalmente, la transmitancia térmica para los termopaneles de doble vidriado es de  $U = 2,739$  ( $W/m^2K$ ).

Para las pérdidas de calor que se tienen en el techo, se debe analizar el material del techo, y de la estructura que se tiene para la sujeción de este, considerando también el aislante ocupado.

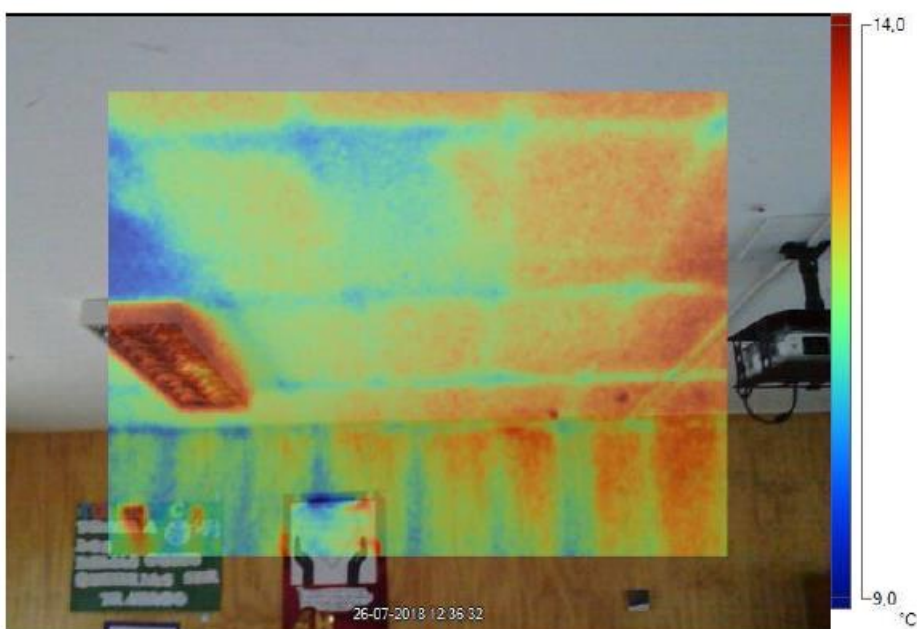


Figura 2-6 Fotografía termográfica del techo mostrando los puentes térmicos por los perfiles de acero  
Fuente: CEGA

En la figura 2-6 se logra apreciar los puentes térmicos que generan los perfiles de acero que se ocupan para la montura de techo que se encuentran por sobre las planchas de yeso cartón, además de ver la aislación que presenta en los espacios que hay entre cada perfil. La transmisión de calor se presenta en 2 maneras distintas, una a través de los puentes térmicos que dejan los perfiles de acero, y otra a través de la aislación presente en todo el espacio vacío, por lo que se debe ver la transmitancia térmica ocupando la fórmula de la transmitancia promedio  $\bar{U}$  siguiendo el mismo método expuesto al principio para la transmitancia de las paredes. Los valores y conformación del techo, así como sus espesores se encuentran en el capítulo anterior (ver punto 1.3.2).

Para obtener las pérdidas de calor que se tienen ahora por el piso, la norma establece la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{piso}} = Kl * P * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

**$Kl$  = Transmitancia térmica lineal (W/mK)**

**$P$  = Perímetro del área (m)**

**$T_{\text{int}}$  = Temperatura interior (K)**

**$T_{\text{ext}}$  = Temperatura exterior (K)**

La norma establece la siguiente clasificación para el coeficiente de transmitancia térmica lineal según el nivel de aislación que pueda presentar el piso del área en estudio:

Tabla 2-3 Transmitancia térmica lineal para los niveles de aislación

Aislación del piso o radier	Resistencia térmica total, $R_T$ $\text{m}^2 \times \text{°C/W}$	Transmitancia térmica lineal, $K_\ell$ $\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$
Corriente	0,15 - 0,25	1,4
Medianamente aislado	0,26 - 0,60	1,2
Aislado	> 0,60	1,0

Fuente: Norma Chilena 853

En este caso se tiene un piso en las salas sin niveles de aislación, por lo que se selecciona el primer caso en la tabla, dando una transmitancia térmica lineal de 1,4 (W/mK). El perímetro debe ser el de la infraestructura completa, debido a que solo pierde calor las limitaciones con el exterior y no las limitaciones con las paredes que hay entre salas.

Una correcta ventilación es necesaria a modo de asegurar la calidad del aire interior, permitiendo disminuir los niveles de CO<sub>2</sub> producto de la respiración de los ocupantes. Estos cambios pueden ocurrir debido a factores de ventilación natural (ventanas abiertas, rendijas entre las puertas y paredes) o ventilación forzada (extractores

o ventiladores). Estos factores pueden suponer una pérdida o ganancia de calor dependiendo de los valores de temperatura exterior y humedad, esto se ve expresado mediante la siguiente ecuación (Valera, Molina & Alvarez, 2008):

$$\dot{Q}_{ren} = \frac{C_{aire}}{1.000} * \rho_{ai} * [C_{pa} (T_i - T_e) + L_v (X_i - X_e) + C_{pv} (X_i * T_i - X_e * T_e)]$$

**$\dot{Q}_{ren}$** : Calor por renovación de aire (W)

**$C_{aire}$** : Caudal de aire renovado (L/s)

**$\rho_{ai}$** : Densidad del aire. A presión y temperatura estándar igual a 1,29 (kg/m<sup>3</sup>)

**$C_{pa}$** : Calor específico del aire. A presión y temperatura estándar igual a 1.012 (J/kg K)

**$L_v$** : Calor latente de vaporización de agua. A 0°C igual a 2.502.532 (J/kg)

**$C_{pv}$** : Calor específico del vapor recalentado. A 0°C igual a 1.875,7 (J/kg K)

**$X_i$** : Humedad absoluta del aire interior (Kg-agua/Kg-aire)

**$X_e$** : Humedad absoluta del aire exterior (Kg-agua/Kg-aire)

La humedad absoluta, es la cantidad de agua que hay en proporción al aire seco, y debido a que tenemos renovaciones de aire tanto la humedad interna como externa serán iguales. Por otro lado, dado que la masa del agua es mucho menor en comparación con la del aire, el aporte energético termina siendo despreciable, anulándose también el último término, por lo que la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{ren} = \frac{C_{aire}}{1.000} * \rho_{ai} * c_{pa} (T_i - T_e)$$

Se consideran para la pérdida de calor por éste último concepto las estimaciones que hace los términos de referencia estandarizados del ministerio de obras públicas (TDRe), que estiman que para asegurar la calidad del aire se necesitan 5 (L/s) por cada persona, y una renovación de aire en espacios donde no hay gente de 1,5 (1/h). Con base en estos datos se calculan las pérdidas de energía por renovaciones de aire.

Dada las consideraciones expuestas, en la siguiente tabla se muestran las transmitancias de los distintos elementos que se analizaron:

Tabla 2-4 Transmitancia térmicas para los distintos pabellones

Transmitancia térmica (W/m <sup>2</sup> K)			
	Pabellón 1	Pabellón 2	Pabellón 3
Paredes	0,365	0,573	0,316
Ventanas	2,74	2,74	2,74
Techo	0,758	0,9676	0,758

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos

Un parámetro que influye en la generación de calor es el metabolismo propio de cada persona que libera calor al ambiente, aunque en sí no es demasiado el aporte de calor, si debe considerarse ya que no es despreciable. Dentro de las disposiciones que se consideran, la radiación del cuerpo depende altamente de la vestimenta de la persona donde ésta actúa como aislación, su unidad de medida es el CLO, donde 0 CLO corresponde a una persona desnuda y 1 CLO corresponde a una persona con terno, donde la Transmitancia térmica de éste último caso es de 0,155 (m<sup>2</sup>K/W) ([GEEEduc, 2012](#)). El área de superficie corporal (ASC) presenta distintos métodos de cálculos típicos, llegando a ser bastante simples algunos, sin embargo, es preferible enfocarse en valores típicos debido a que incluye variables de peso y altura, siendo más práctico un valor estimativo que el cálculo de cada alumno. Un valor normal de ASC que es comúnmente aceptado es de 1,7 (m<sup>2</sup>) ([Haycock, Schwartz & Wisotsky](#)). La temperatura interior en este caso se trata de la temperatura corporal típicamente de unos 37 °C, debido a que es ésta la que cede energía al ambiente, y la temperatura dentro de la sala sería la temperatura exterior, donde se determinó que una temperatura de confort es de 20 °C. Se estima que cada sala cuenta con 28 alumnos más el profesor, dando un total de 29 personas por sala siendo un total de 11 salas, como resultado se obtiene la siguiente estimación para el aporte calórico dado por el metabolismo:

$$\dot{Q}_{met} = U * A * (T_i - T_e)$$

**$\dot{Q}_{met}$  = Calor generado por metabolismo humano (W)**

**$A$  = Área del cuerpo (m<sup>2</sup>)**

**$U$  = Transmitancia de la ropa (m<sup>2</sup>K/W)**

**$T_i$  = Temperatura Corporal (°C)**

**$T_e$  = Temperatura ambiental (°C)**

Por último, se consideran el aporte de calor generado por el sol para ver el impacto que se tiene en el dimensionamiento de la bomba de calor y en la demanda del sistema. Se decide simular el aporte de energía a través del software de modelado *SketchUp* en conjunto con el software de cálculo *Energy Plus*.

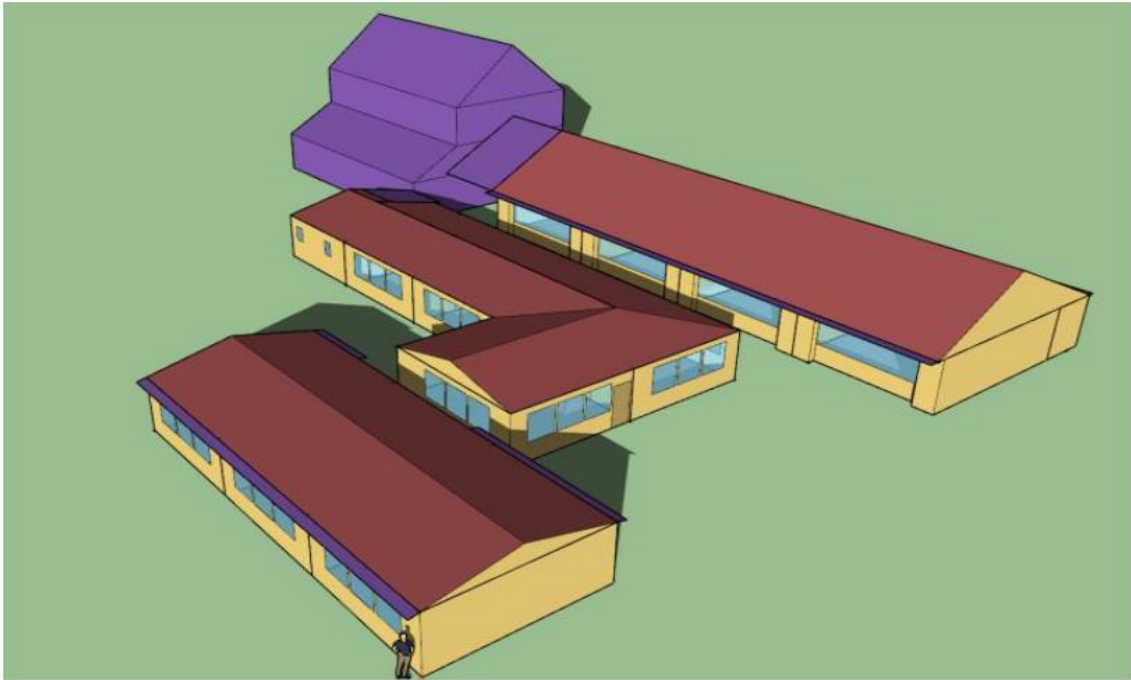
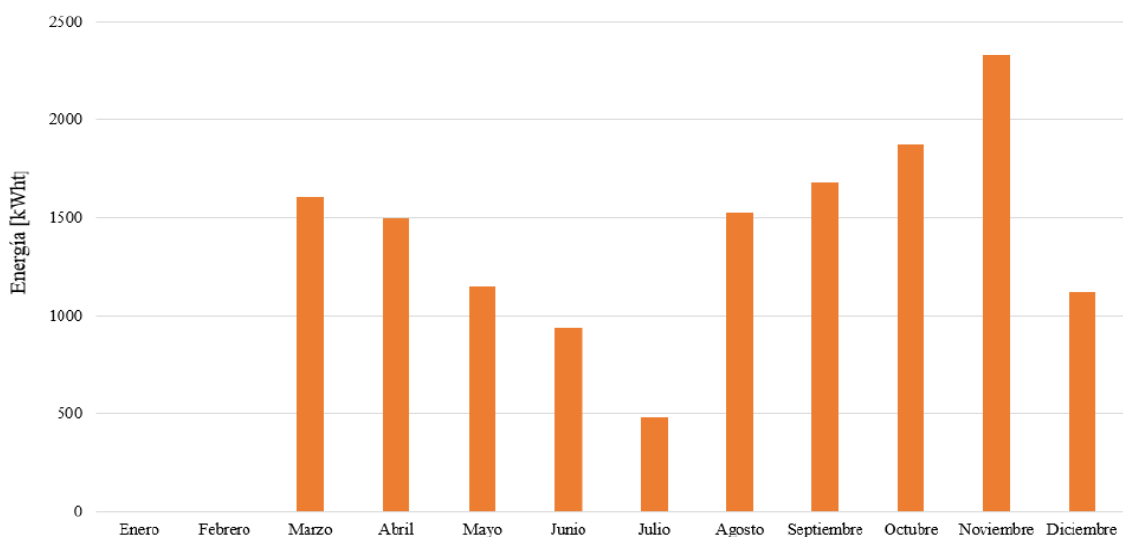


Figura 2-7 Modelado y simulación por Sketchup  
Fuente: CEGA

Los resultados arrojados por el software están sujetos al horario de clases que dispone el liceo, y del mismo modo se acota de marzo a diciembre considerando que el sistema no funciona los fines de semana, ni las vacaciones de invierno, también como a comienzo de vacaciones de verano.

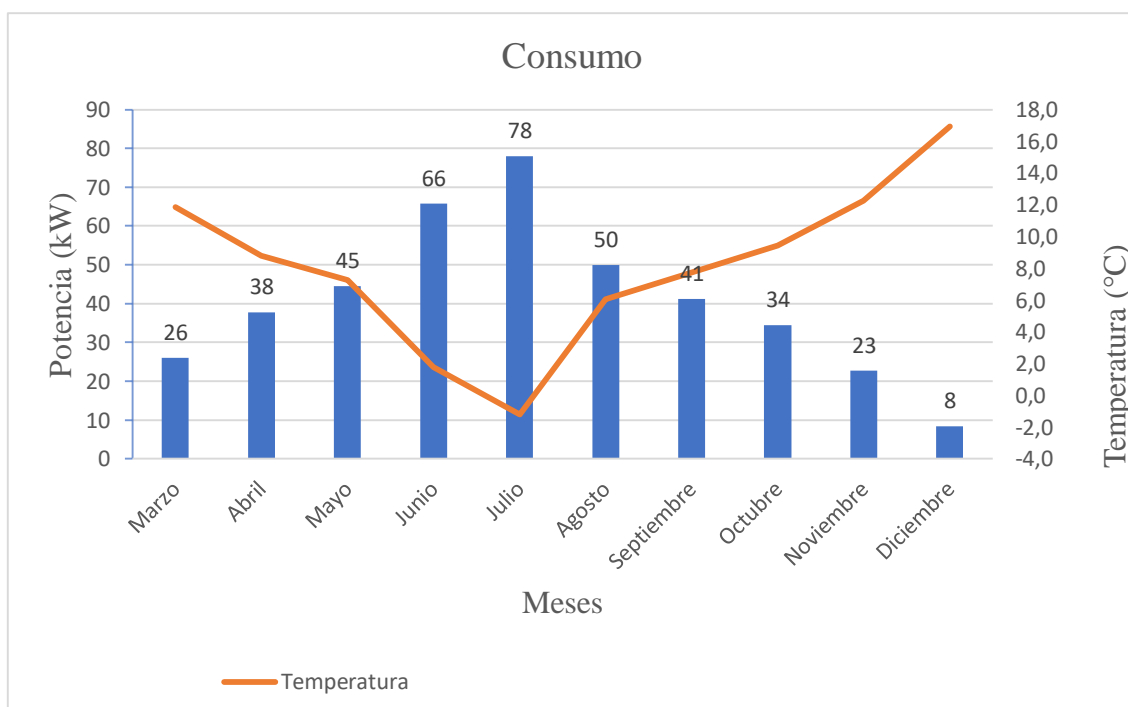


Gráfica 2-1 Aporte mensual solar por las ventanas  
Fuente: CEGA

Los resultados de la simulación muestran una tendencia a un menor aporte a medida que pasan los meses, llegando al punto de menor aporte en el mes de julio, debido en buena medida a que el sistema se ocupará poco ese mes a causa de las vacaciones de

invierno. A medida que pasan los meses el aporte energético se vuelve cada vez mayor, dando un aporte energético total de 14.000 (kWh) de aporte anual al sistema aproximadamente.

Las temperaturas de la ciudad de Coyhaique se aprecian en la gráfica 1.3, pero el sistema no va a funcionar las 24 horas del día ni los 7 días de la semana, por lo que se restringe el monitoreo de temperaturas a solo los días de clases, entre el horario de las 7:00 hasta las 16:00 todos los días sin contar los fines de semana. El período en que se controlan las temperaturas está acotado desde marzo hasta la primera segunda de diciembre que es donde comienzan las vacaciones de verano, además de no considerar 3 semanas del mes de julio, debido a las vacaciones de invierno. Con base en lo anterior se estima la potencia para cada hora de funcionamiento durante el año en función de todas las temperaturas registradas por la estación de monitoreo en el año 2018 ([Red Agrometeorológica](#)), y se saca el promedio por mes además de incluir la temperatura promedio.



Gráfica 2-2 Potencia promedio por mes  
Fuente: Elaboración propia en base a cálculos

Debido a que la empresa instaladora trabaja con cierto tipo de bomba de calor geotérmica, se opta por bombas de calor españolas de la marca *Ecoforest*. Estas bombas tienen una capacidad para producir hasta 28 (kW) siendo instaladas 2 unidades, con un total de 56 (kW) de potencia máxima en total, por lo que para los meses de Junio y Julio se estaría bajo la demanda que solicita la infraestructura. Sin embargo, la gráfica 2-3 nos da una apreciación distinta debido que toma en consideración la cantidad de horas en operación que nuestro sistema tiene en el mes, por lo que se obtiene la cantidad de energía demandada en un mes.

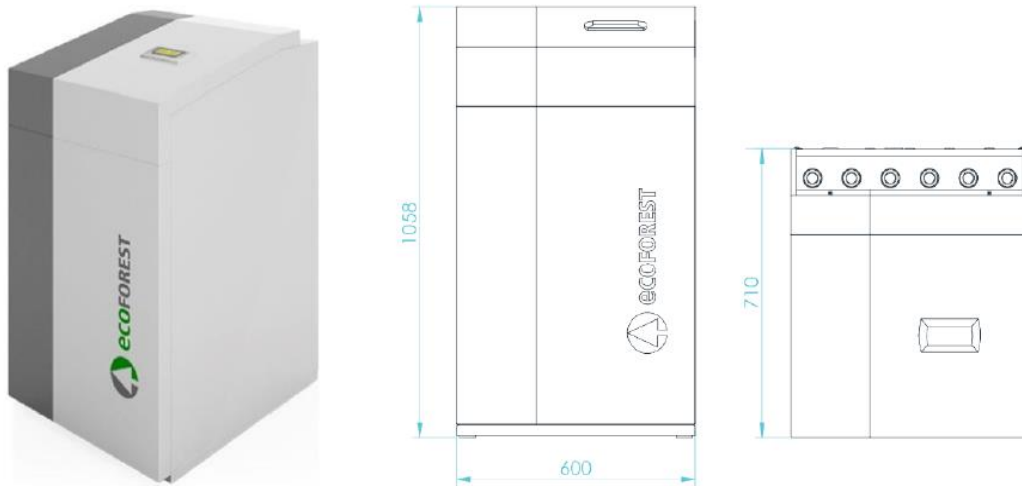
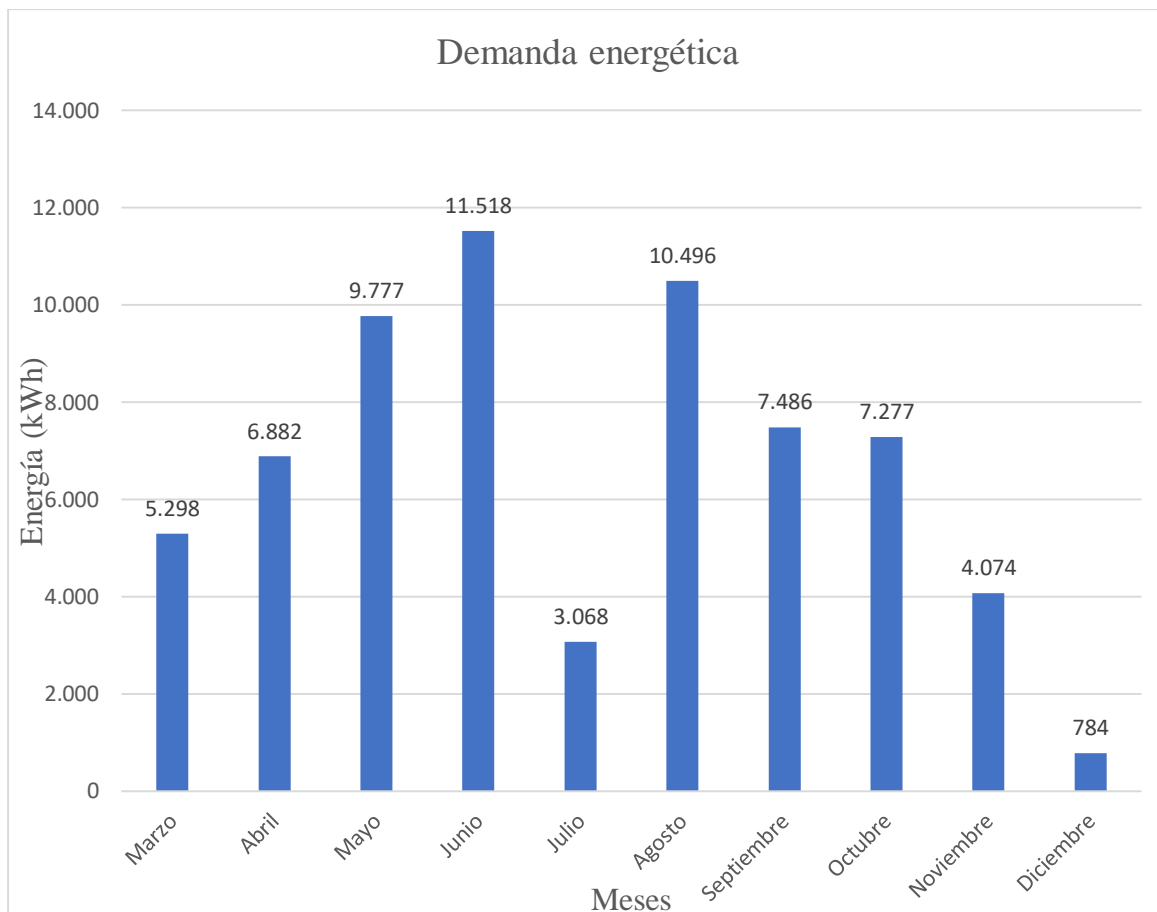


Figura 2-8 Bomba de Calor Ecoforest  
Fuente: Ecoforest



Gráfica 2-3 Demanda energética promedio por Mes  
Fuente: Elaboración Propia

Se hace notar la baja demanda que se tiene en los meses de Julio y Diciembre debido a la baja cantidad de horas que se ocupa el sistema en Julio, y en parte a las mayores temperaturas en el mes de diciembre junto con la menor cantidad de horas también. La demanda energética anual es de aproximadamente 66.000 (kWh).

### 2.3 DIMENSIONAMIENTO DE BOMBAS DE CIRCULACIÓN

Los requerimientos que se necesitan de la bomba pasan por las necesidades que requieren los equipos fan coil del sistema en su presión y caudal. Al ser un sistema cerrado en agua a alta temperatura, la presión del sistema depende únicamente de la pérdida de carga que pueda poseer al pasar el agua por los equipos, por el largo de las tuberías y por los diferentes elementos propios del fitting (codos, válvulas, etc).

El primer dato viene dado por el fabricante del equipo, que en este caso se seleccionó el modelo *MKG-600-B (Midea)* debido a la capacidad de calefacción para la necesidad de la infraestructura. La potencia de calefacción de los equipos varía desde los 5,2 hasta los 6,7 (kW) dependiendo de la velocidad de trabajo de equipo (Velocidad alta, media o baja). La pérdida de carga es de 0,397 bar para el equipo seleccionado (Ver Anexo).

En segunda instancia, para poder obtener las pérdidas de carga que se generan por la fricción del fluido con las paredes de la tubería, se calcula en base a la ecuación de Darcy-Weisbach (Robert Mott, 2013).

$$h_{L\ mayor} = f * \frac{L_{tub}}{\phi_{int}} * \frac{v^2}{2g}$$

$h_{L\ mayor}$  = Pérdida de carga mayor (m.c.a.)

$f$  = Factor de fricción de Darcy (-)

$L_{tub}$  = Largo de la tubería (m)

$\phi_{int}$  = Diámetro interno de la tubería (m)

$v$  = Velocidad del fluido (m/s)

$g$  = Aceleración de gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>)

Las dimensiones de la tubería se encuentran en el plano de distribución (Ver Anexo). El factor de fricción de Darcy, es un número adimensional que expresa la relación que hay entre el fluido y el material de la tubería (polipropileno), que a su vez depende del tipo de flujo que se tenga en operación (laminar o turbulento). El tipo de flujo que se tiene depende a su vez del número de Reynolds, donde un Reynolds < 2300 significa un flujo laminar, y un Reynolds > 4000 significa un flujo turbulento, y se puede calcular con la siguiente expresión:

$$Re = \frac{V * \phi_{int}}{v}$$

$Re$  = Número de Reynolds (-)

$V$  = Viscosidad cinemática. Para el agua a 20°C igual a  $1,9 \times 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

$\phi_{int}$  = Diámetro interior de la tubería (m)

$v$  = Velocidad del fluido (m/s)

Debido a la conexión en paralelo de los equipos por cada uno de los pabellones, el caudal necesario en cada pabellón es la suma de los caudales que requiere cada equipo individualmente, además se recomienda una velocidad de trabajo que se encuentre entre los 0,5 (m/s) hasta 2 (m/s). En base a esto, se estima un flujo turbulento para la operación del sistema, por lo que el factor de Darcy se calcula usando la siguiente expresión como aproximación de la fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * \phi_{int}} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$$

***f*** = Factor de fricción de Darcy (-)

***ε*** = Rugosidad de la tubería. Para el PPR es 7 μm.

***φ<sub>int</sub>*** = Diámetro interior de la tubería (m)

***Re*** = Número de Reynolds (-)

Por último, el tercer factor que influye en la pérdida de carga, las pérdidas por fitting, se calculan bajo la siguiente expresión:

$$h_{l\text{ menor}} = K_L * \frac{v^2}{2g}$$

***h<sub>l menor</sub>*** = Pérdidas de carga por fitting (-)

***K<sub>L</sub>*** = Coeficiente de pérdida (Depende del fitting) (-)

***v*** = Velocidad del fluido (m/s)

***g*** = Aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>)

La figura 2-9 muestra los coeficientes para la pérdida de carga debido a los distintos elementos presentes en la instalación de las redes de agua en la infraestructura.

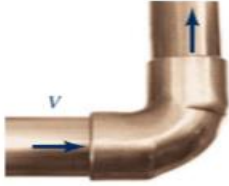

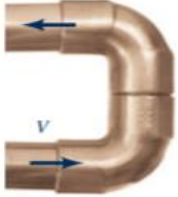




Component	$K_L$	
<b>a. Elbows</b>		
Regular 90°, flanged	0.3	 90° elbow
Regular 90°, threaded	1.5	
Long radius 90°, flanged	0.2	
Long radius 90°, threaded	0.7	
Long radius 45°, flanged	0.2	
Regular 45°, threaded	0.4	
<b>b. 180° return bends</b>		
180° return bend, flanged	0.2	 45° elbow
180° return bend, threaded	1.5	
<b>c. Tees</b>		
Line flow, flanged	0.2	 180° return bend
Line flow, threaded	0.9	
Branch flow, flanged	1.0	
Branch flow, threaded	2.0	
<b>d. Union, threaded</b>	0.08	 Tee
<b>*e. Valves</b>		
Globe, fully open	10	 Tee
Angle, fully open	2	
Gate, fully open	0.15	 Tee
Gate, $\frac{1}{4}$ closed	0.26	
Gate, $\frac{1}{2}$ closed	2.1	
Gate, $\frac{3}{4}$ closed	17	
Swing check, forward flow	2	 Union
Swing check, backward flow	$\infty$	
Ball valve, fully open	0.05	
Ball valve, $\frac{1}{4}$ closed	5.5	
Ball valve, $\frac{3}{4}$ closed	210	

Figura 2-9 Coeficientes de pérdida para Fitting

Fuente: Fundamentals of Fluid Mechanics 7th edition (Munson, Okiishi, Huebsch &amp; Rothmayer)

Con los parámetros y métodos expuestos, se pueden obtener las pérdidas de carga de los distintos pabellones y los caudales que se requieren. El resumen del detalle se muestra en la tabla 2-5.

Tabla 2-5 Pérdidas de carga y Caudales para los distintos pabellones

Circuito	Pérdida de carga (m.c.a.)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
Pabellón 3	7,1	5
Pabellón 2	6,8	3,5
Pabellón 1	6,4	2,5

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos

Por último, se presenta la curva característica de la bomba seleccionada, de la marca con la que trabajan los instaladores de los equipos. La bomba seleccionada, es de la marca Wilo, modelo Top S 30/10. Se comprueba efectivamente que bajo las condiciones de operación que presenta el sistema se cumple el buen funcionamiento de las bombas.

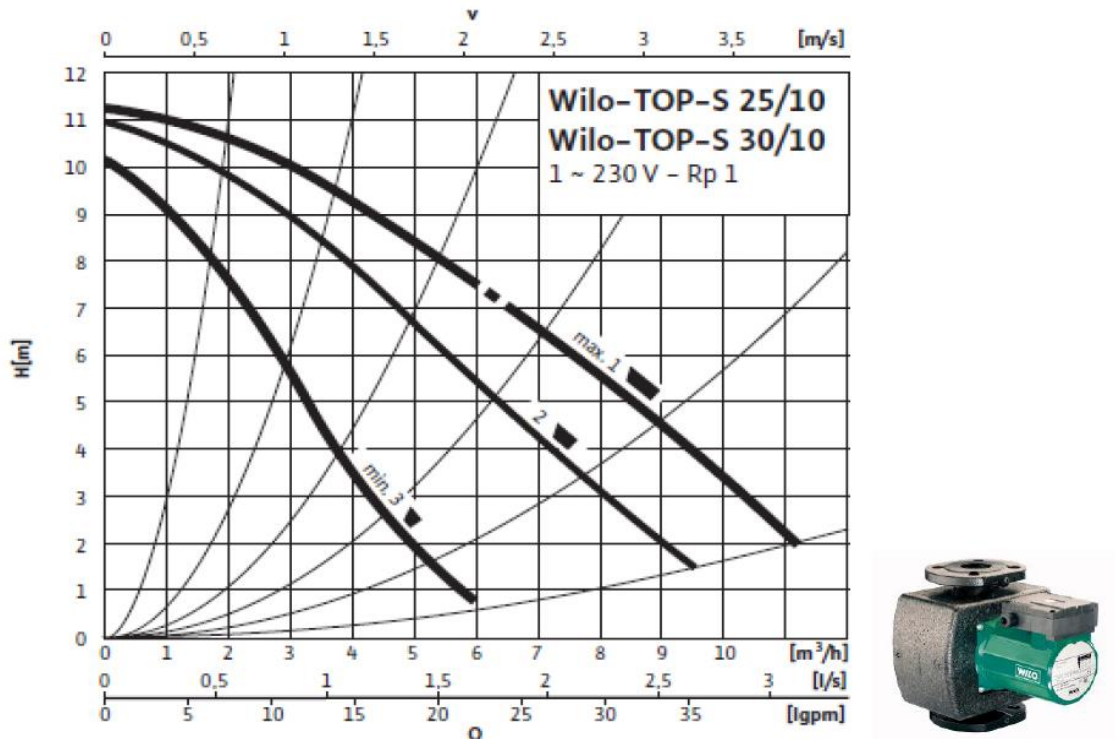


Figura 2-10 Curva característica de la bomba Wilo Top S 30/10  
Fuente: Wilo

## 2.4 DIMENSIONAMIENTO ESTANQUE DE INERCIA

Para el dimensionamiento del estanque es importante visualizar la función que cumplirá dentro del sistema para obtener el correcto dimensionamiento. Un estanque más grande afecta al tiempo de ejecución que necesita el sistema bajando la eficiencia del mismo, mientras que un estanque demasiado pequeño podría no absorber la suficiente cantidad de energía mientras se solicitan altas demandas de los equipos.

Existen distintos criterios y métodos de cálculos empíricos según diversos factores como la potencia necesaria, el tipo de calefactor, según el caudal necesario, etc. Otro método es ocupando un criterio simple para bombas de calor geotérmicas donde se ocupa una relación proporcional de 25 (L/kW) para sistemas con uso intermitente, y de 80 (L/kW) para uso continuo.

El método que se selecciona consiste en buscar la relación entre la menor potencia de operación versus la menor potencia de pérdida, para confirmar que el estanque va a ser capaz de suplir la demanda exigida sin necesidad de sobre exigir a la bomba de calor, según la siguiente expresión:

$$m = \frac{(\dot{Q}_{\min} - \dot{Q}_{\text{zona}}) * \Delta t}{\Delta T_{\text{op}} * C_{pw}}$$

$\dot{Q}_{\min}$  = *Potencia mínima de la operación de fuente de calor (W)*

$\dot{Q}_{\text{zona}}$  = *Demanda de calor de la zona más pequeña (W)*

$\Delta t$  = *Tiempo de operación (s)*

$\Delta T_{\text{op}}$  = *Rango de temperatura de operación (K)*

$C_{pw}$  = *Calor específico del agua. Igual a 4180 (J/kg K)*

$m$  = *Masa de agua del estanque (kg)*

La potencia mínima de operación del sistema corresponde en la situación donde solo una de las dos bombas se encuentra en funcionamiento a mínima operación, que es de 7 kW, además la zona más pequeña corresponde a los baños del segundo pabellón con una demanda aproximada de 100 W. Con una base de cálculo en 1 hora y permitiendo al estanque enfriarse 5°C antes de necesitar energía de la bomba de calor, se resuelve cuando menos un estanque de 1200 L de capacidad.

De este modo, se selecciona en el rango de capacidad de los estanques ofrecidos por el proveedor, un estanque de 1500 L marca Elbi, modelo Puffer P-1500 Plus, con una altura de 2,5 m, un diámetro de 1,1 m y 450 kg.



Figura 2-11 Estanque de almacenamiento del sistema de calefacción.

Fuente: Propia

## **2.5 COSTOS ASOCIADOS AL PROYECTO**

En primera medida, se analizan los costos asociados principalmente al sistema de calefacción que se tenía con anterioridad al proyecto ejecutado, con el fin de poder comparar el beneficio que se tiene con el actual sistema implementado.

El sistema de calefacción que funcionaba con anterioridad consistía en dos calderas centralizadas que calentaban el agua a 60°C y calentaban distintos radiadores

repartidos por varios pabellones, contando salas, oficinas, pasillos etc. Cerca de 45 radiadores se ocupaban en distintas medidas que abarcaban desde 40 cm hasta los 240 cm, siendo el más común el de 180 cm, además la caldera calienta las duchas del colegio para los alumnos.

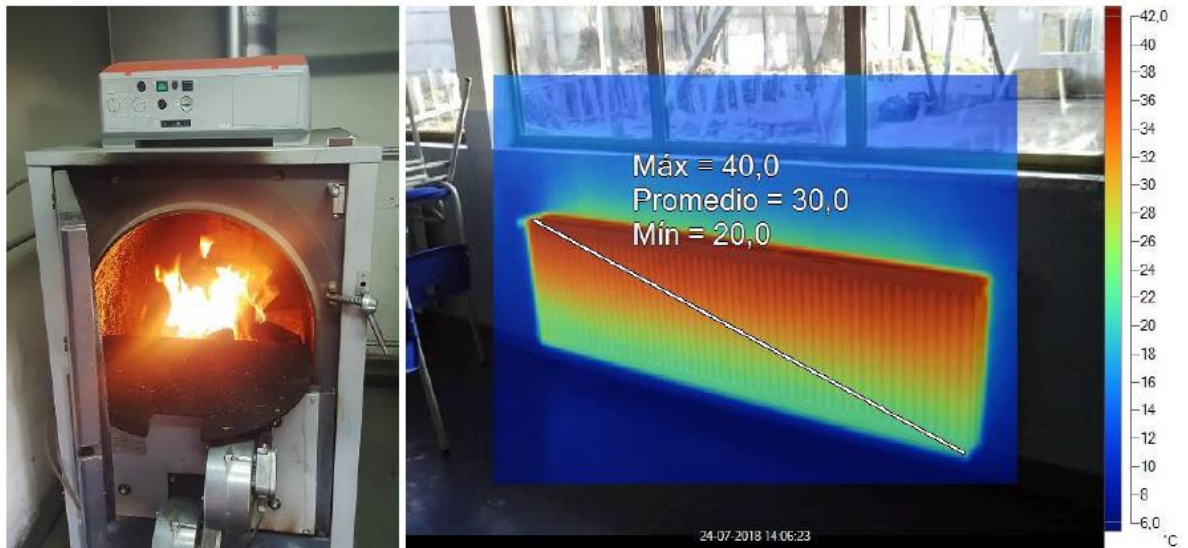


Figura 2-12 Caldera y Radiadores del Liceo Altos del Mackay  
Fuente: CEGA

Es importante mencionar que para los pabellones 1 y 2, debido a que se construyeron con posterioridad en el Liceo, no cuentan con calefacción mediante los radiadores, sino que cuentan con una estufa de combustión lenta por cada una de las salas. Tienen una baja eficiencia en comparación con los radiadores, donde además contribuyen a la contaminación propiamente de la ciudad. La sensación térmica de cada estufa es correspondiente con la cercanía que tiene el usuario con la misma, por lo que la convierte en un modo poco eficiente e insuficiente al mismo tiempo de calefaccionar las salas.

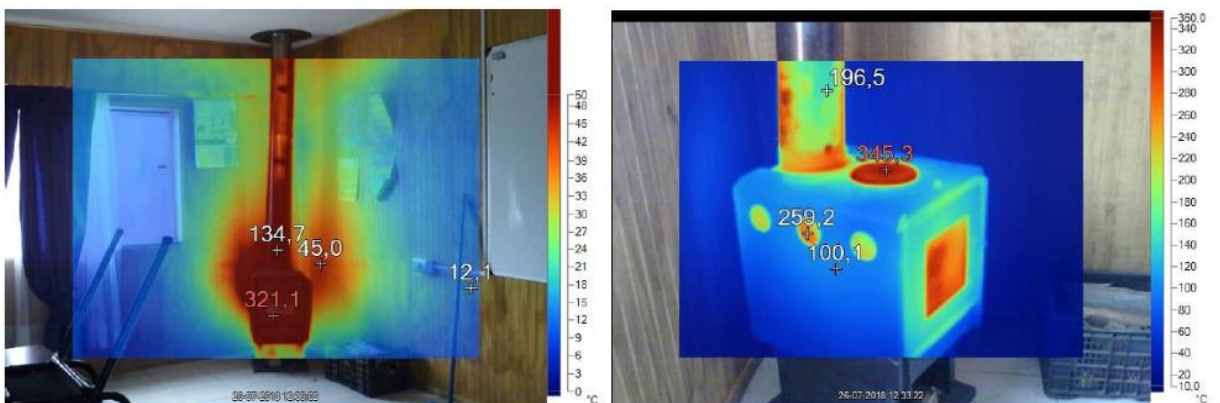
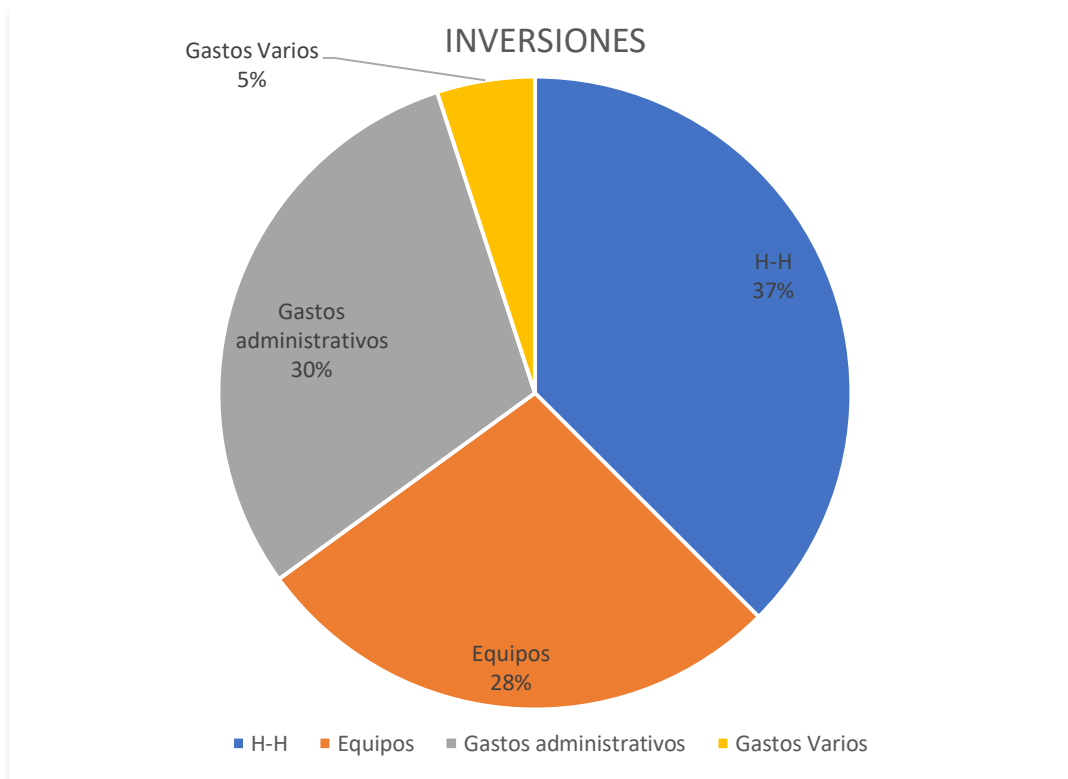


Figura 2-13 Estufas de combustión lenta, a la izquierda se ve la poca eficiencia de transmisibilidad con los alrededores y a la derecha las temperaturas de trabajo.

Fuente: CEGA

Estimaciones indican que se consumen aproximadamente cerca de 200 m<sup>3</sup> de leña al año en el Liceo, la cual tiene un almacenamiento en una leñera al costado del colegio. El costo de la leña por cada m<sup>3</sup> es de \$30.000 CLP más IVA, dando un total aproximado de \$7.200.000 CLP al año gastados solo en leña como combustible.

En materia de la inversión inicial del proyecto, se deben separar los distintos ítems que se consideraron para la realización del proyecto. Una apreciación general de los gastos está dada en la gráfica 2-4 que dan cuenta de la proporción entre los distintos ítems.



Gráfica 2-4 Distribución de las inversiones para el proyecto

Fuente: Elaboración propia

Se da cuenta del alto nivel de los gastos que se tienen por concepto de Horas Hombre y también por gastos administrativos, sumando más de la mitad de la inversión total de \$200 MM. Los gastos por hora hombre se ubica en el más alto debido en buena parte a las distintas contrataciones que el CEGA hizo para la gestión del proyecto en terreno, donde se pagaban sueldos de supervisores en terreno, mano de obra de pequeños trabajos, y distintos gastos a lo largo de los meses. En gastos administrativos se tienen en cuenta las salidas a terreno para las distintas mediciones y el levantamiento de la obra en sus distintas etapas, así como los gastos por concepto de instalación y puesta en marcha del sistema. Datos más detallados del costo de equipos y las distintas instalaciones por parte de contrataciones se hacen en la tabla 2-6 a partir de las distintas cotizaciones que se obtuvieron por parte de proveedores y empresas contratistas.

Tabla 2-6 Costos asociados a la construcción e instalación del proyecto

Ítem	Cantidad	Valor Unitario (\$CLP)	Total (\$CLP)
Construcción y Habilitación de pozos	2	\$15.172.500	\$30.345.000
Bomba de Calor Geotérmica	2	\$8.650.933	\$17.301.866
Estanque Acumulador	1	\$2.749.014	\$2.749.014
Intercambiador de calor de placas paralelas	1	\$2.320.500	\$2.320.500
Fan coil de muro	13	\$580.125	\$7.541.625
Controladores de temperatura y válvulas de equilibrado	13	\$116.620	\$1.516.060
Bomba de Rotor Húmedo	3	\$388.416	\$1.165.248
Instalación de Equipos	-	-	\$22.491.000
Traslados de equipos y puesta en marcha	-	-	\$2.142.000
Habilitación de Sala de Máquinas	-	-	\$1.584.130
Habilitación de empalmes eléctricos	-	-	\$9.766.000
<b>Total</b>	-	-	<b>\$98.922.443</b>

Fuente: CEGA

Los costos asociados al sistema de calefacción por geotermia, se basan principalmente en el costo de luz por mantener las bombas de calor en funcionamiento durante el período contemplado. Con el fin de poder proyectar los costos del sistema se verifican los precios de la empresa distribuidora de la zona y la tarifa a la que está sujeta el Liceo. La empresa a cargo de la distribución de electricidad en la ciudad de Coyhaique, es la *Sociedad Austral de Electricidad S.A.* (Grupo SAESA) y la tarifa correspondiente al Liceo es la BT4 que se ve en la tabla 2-7. Cabe destacar que la demanda máxima en horas punta no influye en el costo, debido a que la hora punta corre desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre desde las 18:00 hasta las 23:00. Como se ha mencionado anteriormente, la demanda proyectada para el colegio solo contempla el horario de funcionamiento que es hasta las 16:00.

Tabla 2-7 Tarifa de costos eléctricos para la ciudad de Coyhaique

Coyhaique	Tarifa eléctrica IVA incluido (\$CLP)
Administración del servicio (\$/mes) BT4	2.973,62
Cargo fijo Exento de IVA (\$/kWh)	0,392
Cargo por energía (\$/kWh)	89,285
Cargo por demanda máxima (\$/kW/mes)	9.452,85
Cargo por demanda máxima en horas punta (\$/kW/mes)	23.849,43

Fuente: Grupo SAESA

En base a las tarifas que se establecen, se necesita saber la cantidad de consumo eléctrico que tienen los equipos, principalmente las dos bombas de calor, las 3 bombas de circulación, los 13 equipos fan coil y la bomba del pozo de agua. Los consumos de los Fan coil y las bombas de circulación son bajos en comparación con las bombas de calor,

donde cada una de las bombas consume 390 W a máxima velocidad, y los equipos Fan coil consumen cada uno 66 W en su máxima potencia (Ver anexos). El consumo de la bomba de calor depende esencialmente de la demanda que se le solicita al sistema y del factor de rendimiento que el fabricante asegura para su equipo llamado *Coefficient of Performance (COP)*, que para nuestra bomba de calor es igual a 4,9. Dividiendo la demanda térmica por el COP obtenemos el consumo eléctrico de las bombas de calor, por lo que sumándolo a la demanda fija de las bombas y los equipos fancoil se obtiene el consumo total eléctrico.

Se obtienen las demandas máximas de la base de datos consultada en el sitio [Agromet.inia.cl](http://Agromet.inia.cl) para calcular el consumo de la demanda máxima, que tiene un valor aditivo en la tarifa, y se toman los valores ya calculados en el gráfico 2-3 de la demanda para obtener la tarifa por consumo fija. Las demás tarifas son fijas por lo que los valores de los costos se reflejan en la tabla resumen 2-8.

Tabla 2-8 Resumen de costos para el sistema de calefacción en Liceo

	<i>Tarifa por kWh (\$)</i>	<i>Tarifa por demanda máxima (\$)</i>	<i>Tarifa de cargo fijo por cada kWh (\$)</i>	<i>Cargo fijo administrativo (\$)</i>	<i>Total (\$)</i>
<i>Marzo</i>	\$ 96.537	\$ 173.659	\$ 424	\$ 2.974	\$ 273.594
<i>Abril</i>	\$ 125.400	\$ 178.711	\$ 551	\$ 2.974	\$ 307.636
<i>Mayo</i>	\$ 178.151	\$ 180.878	\$ 782	\$ 2.974	\$ 362.785
<i>Junio</i>	\$ 209.874	\$ 238.631	\$ 921	\$ 2.974	\$ 452.400
<i>Julio</i>	\$ 55.903	\$ 219.860	\$ 245	\$ 2.974	\$ 278.982
<i>Agosto</i>	\$ 191.252	\$ 193.151	\$ 840	\$ 2.974	\$ 388.217
<i>Septiembre</i>	\$ 136.406	\$ 162.109	\$ 599	\$ 2.974	\$ 302.088
<i>Octubre</i>	\$ 132.597	\$ 164.274	\$ 582	\$ 2.974	\$ 300.427
<i>Noviembre</i>	\$ 74.234	\$ 136.841	\$ 326	\$ 2.974	\$ 214.375
<i>Diciembre</i>	\$ 14.286	\$ 87.030	\$ 63	\$ 2.974	\$ 104.353

Fuente: Elaboración Propia en base a tarifas y horarios

Se tiene que la suma de los costos para el sistema de calefacción da un total aproximado que llega hasta los \$3.000.000 CLP al año.

### **CAPÍTULO 3 PROPUESTAS DE MEJORAS**

### **3.1 MEJORA DE AISLACIÓN ESTRUCTURAL**

Como se mencionó anteriormente en el punto 1.4, se contemplan dos mejoras para el actual sistema, colocando el foco para este primer punto en verificar la calidad de la aislación de las salas según estándares propuestos por entidades gubernamentales. La norma que se ocupa de referencia para la verificación del control de calidad en la aislación es *Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental (TDRe)*, que pertenece a la dirección de Arquitectura del Ministerio de Obras Públicas. Esta misma norma se ha ocupado con anterioridad en el diseño de la bomba de calor como estándar para la calidad del aire al interior de las salas, pero en este punto se verá si se cumplen las condiciones según los propios estándares.

### **3.2 DISEÑO PARA MEJORA EN AISLACIÓN**

La calidad del material como aislación depende principalmente en su diseño de la transmisibilidad, la que a su vez depende de la relación que hay entre la conductividad térmica propia de cada material y el espesor del material para cada caso, es en base en este dato que la TDRe estandariza la calidad de la aislación para cada zona. Como se mencionó anteriormente en el punto 1.3.1 la norma chilena 1079 clasifica a la ciudad de Coyhaique en la zona de Sur Extremo del país, con base en ese punto la TDRe establece las siguientes características para aislación en esa zona:

Tabla 3-1 Transmitancias térmicas para Sur Extremo en Chile

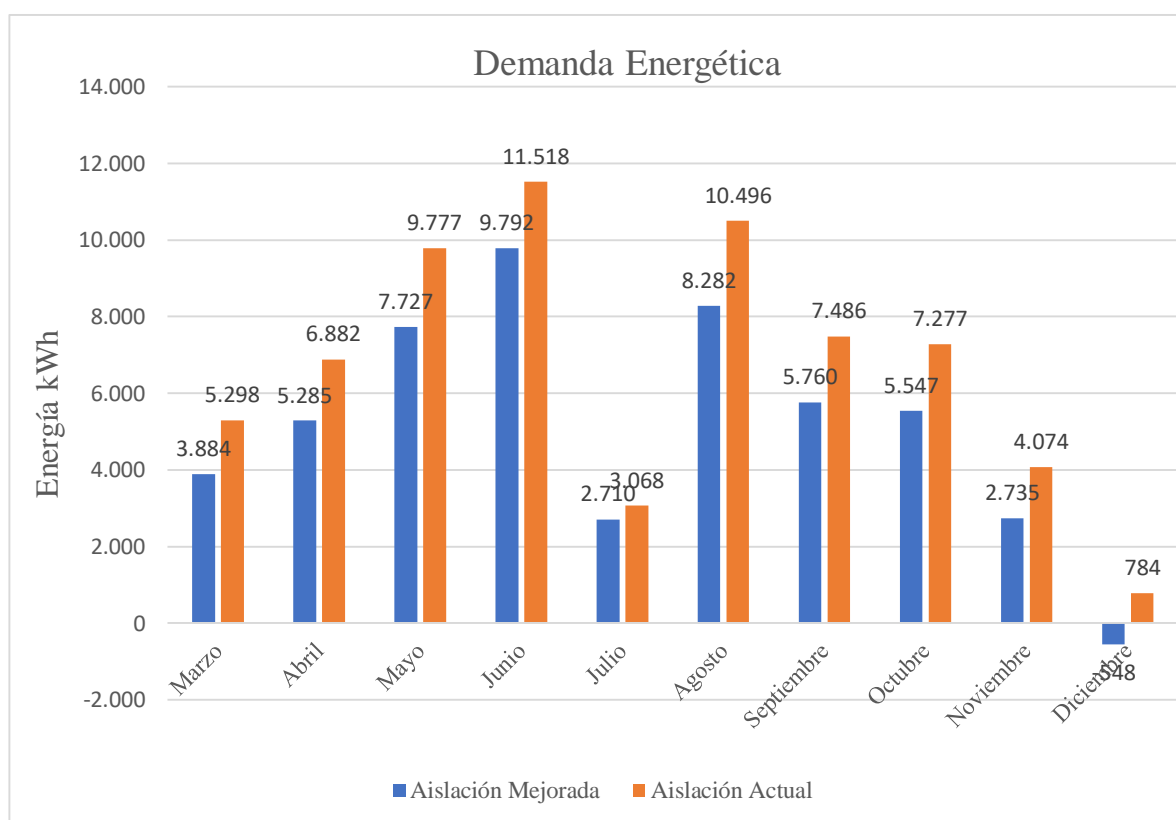
TRANSMITANCIA TÉRMICA MÁXIMA (U) - ENVOLVENTE	
Parámetros Característicos Medios	Valor U
Transmitancia térmica límite de cubierta	0,25
Transmitancia térmica límite de muro de fachada	0,40
Transmitancia térmica límite de pisos en contacto con el terreno	0,40
Transmitancia térmica límite de pisos ventilados	0,50
Transmitancia térmica límite de cerramiento en contacto con el terreno	0,40
Transmitancia térmica ponderada límite paramentos verticales	1,15

Fuente: TDRe Ministerio de Obras Públicas

Para el caso de los muros, la TDRe establece una transmitancia térmica máxima de 0,4 W/m<sup>2</sup>K, por lo que en comparación con las transmitancias térmicas que actualmente poseen los distintos pabellones, encontramos que tanto el pabellón 1 como el 3 cumplen satisfactoriamente con lo establecido por la norma, dejando al pabellón 2 como el único que no cumple satisfactoriamente la norma (Ver Tabla 2-4). Para el caso del techo, lo establecido como transmitancia térmica máxima es de 0,25 W/m<sup>2</sup>K, lo que en

comparación con la transmitancia actual vemos que ninguna cubierta cumple con la transmitancia, siendo necesaria la intervención en todos los techos con mejoras en aislación (Ver tabla 2-4).

Una simulación hecha en base a los estándares que se establece el TDRe para las edificaciones que incumplen esta norma muestra los siguientes resultados para el impacto que presenta en el sistema de calefacción.



Gráfica 3-1 Comparación en mejora de Aislación  
Fuente: Elaboración Propia

La proyección muestra que la eficiencia del sistema mejora en un 22%, además de que no se necesitaría el sistema de calefacción para el mes de diciembre. Sin embargo, para este último punto, es importante hacer notar que la estimación es en base a promedios, por lo que a temperaturas puntuales, más probablemente en las horas de la mañana, sea necesario ocupar el sistema de calefacción durante intervalos cortos de tiempo, pero para las estimaciones en costos al caso propuesto no se tomarán en cuenta, debido a que no se puede predecir las frecuencias de uso y no tienen un gran impacto en los costos.

Para poder predecir el tamaño de la inversión necesaria en esta mejora, se debe en primera instancia establecer cuál es la intervención exacta que se debe aplicar a la infraestructura, los materiales requeridos y la mano de obra necesaria. La instalación necesaria que se debe aplicar a los muros del pabellón 2, consiste en un recubrimiento aumentando el espesor de la aislación, hasta alcanzar la transmitancia necesaria para cumplir con los estándares, es debido a ello que se debe estimar cuanta aislación y en que espesor es necesario instalar para poder cumplir con la norma. El mismo criterio se aplica

posteriormente para la aislación que se debe mejorar en el cielo de todos los pabellones. Debido a que tanto el poliestireno como la lana mineral poseen una conductividad térmica casi idéntica, se considera que ambos materiales poseen la misma capacidad de aislación, por lo que se considera el recubrimiento más típico que se encuentra comercialmente para la aislación de estructuras e inmuebles, que sería el poliestireno. No obstante, para el caso de la cubierta en los pabellones, debido a que actualmente ya se encuentra instalada lana mineral y es el material más común para dicha instalación se opta por esta aislación para dicho caso.

Para poder determinar la cantidad de aislación que se debe agregar a los muros del pabellón 2, debemos volver a aplicar la ecuación que se ocupó para dicha situación (Ver punto 2.2). Con base en esa ecuación y debido a que se está agregando aislación a los muros, se debe considerar en esta ocasión la resistencia que producirá la nueva extensión de aislación, por lo que la expresión quedará de la siguiente manera:

$$2,5 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) = 0,12 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) + 0,088 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) + 1,51 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) + 0,052 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) + 0,12 \left( \frac{m^2 K}{W} \right) + \frac{e}{\lambda} \left( \frac{m^2 K}{W} \right)$$

$e = \text{Espesor del material (m)}$

$\lambda = \text{Conductividad térmica del material, para poliestireno igual a } 0,043 \text{ (W/mK)}$

Debido a que la resistencia térmica es el recíproco de la transmitancia, el 0,4 exigido por la TDRe se debe elevar a -1 quedando los 2,5. Los demás datos corresponden a las resistencias térmicas de la conformación propia del muro (Ver figura 1-11), y las resistencias superficiales tanto interna como externa, por lo que ahora se agrega la resistencia de la aislación que se agregará dentro de la ecuación para obtener el espesor.

Se tiene que, para cumplir el estándar de la norma, el espesor del poliestireno que se debe agregar a toda el área del muro debe ser de como mínimo 25 mm aproximadamente. Comercialmente se encuentran distintos espesores para poliestireno expandido, que pueden ser de 25, 40, 50, 100 mm etc. Si bien para cumplir con las especificaciones de la norma, en teoría bastan 25 mm, es recomendable ocupar aislación con espesor de 40 mm debido a que no asume un elevado valor a los costos y de esta manera se asegura en cualquier caso el cumplimiento total de la norma.

De la misma manera se obtienen los espesores para la aislación que debe colocarse en el entretecho para las cubiertas, a modo de cumplir con la especificación de la TDRe, por lo que en el siguiente cuadro resumen se muestran los espesores calculados y los recomendados para su instalación.

Tabla 3-2 Espesores para Aislación

	Espesor Aislación Calculada (mm)	Espesor Aislación Recomendada
Muro Pabellón 2	25	40
Techo Pabellón 1	66	80
Techo Pabellón 2	116	140
Techo Pabellón 3	66	80

Fuente: Elaboración Propia en base a cálculos

Para el caso del revestimiento en el pabellón 2, se recurre a sistema ETICS de aislamiento térmico para el exterior de fachadas. Este sistema se compone principalmente con planchas de poliestireno expandido fijado con mortero aplicado manualmente, seguido de una malla de refuerzo hecha con fibra de vidrio, seguido nuevamente de una capa para acabado de mortero acrílico. En la figura 3-1 se logra ver la configuración para la aplicación del revestimiento, en nuestro caso para no sobre exigir la resistencia del muro, se aplican capas de mortero con un espesor no mayor a 2 mm para evitar sobre cargas, poliestireno de 40 mm de espesor, y la opción de mortero decorativo o marmolina. Es importante mencionar que debido a la superficie de madera terciada presente en el pabellón 2, se debe colocar una malla Jensen antes de colocar el mortero directamente, con el fin de evitar problemas de humedad y putrefacción.

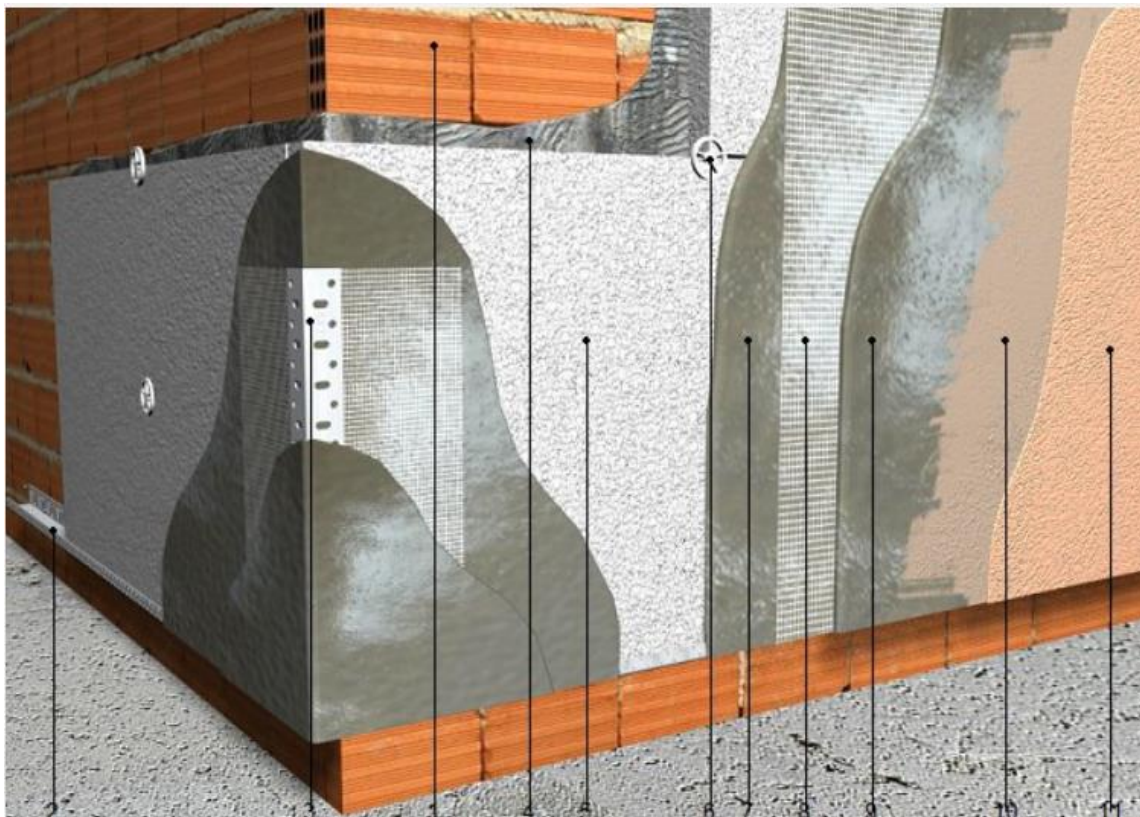


Figura 3-1 Aplicación de revestimiento para muros exteriores según sistema ETICS

Fuente: Chile.generadordeprecios.info

- 1.- Soporte
- 2.- Perfil de Arranque
- 3.- Perfil de Esquina
- 4.- Mortero Adhesivo para fijación del aislamiento.
- 5.- Aislamiento.
- 6.- Fijación Mecánica.
- 7.- Mortero Base.
- 8.- Malla de Refuerzo.
- 9.- Mortero Base.
- 10.- Imprimación
- 11.- Mortero Decorativo.

Para el caso de la aislación que se debe colocar sobre la cubierta, la instalación es bastante simple en comparación con los muros, siendo que solo se debe colocar la lana estirada sobre toda el área que comprenden los pabellones, ya que solo va apoyada encima de la cubierta. Debido a que la lana mineral que se encuentra en el entretecho, posee una cara de aluminio, no es necesario estimar lana con tal característica, sino lana con ambas caras libres.



Figura 3-2 Instalación de lana Mineral sobre cubierta en entretecho  
Fuente: Google Imágenes

Como se ha mencionado anteriormente, para estimar el costo total de la inversión que se requiere para esta mejora, es necesario estimar el costo de materiales y mano de obra. Si bien, para obtener un precio por instalación a menudo se solicitan cotizaciones a

empresas instaladoras, para obtener una referencia en base al mercado actual en esta materia, se hace consulta en la página <http://www.chile.generadordeprecios.info> que entrega un estimativo considerando materiales, mano de obra necesaria, condiciones de instalación, cantidad de personas, uso de herramientas, etc.

Tabla 3-3 Valores para instalación de Aislación

Unidad	Material	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
m	Perfil de Arranque de aluminio como soporte en el zócalo	0,17	\$ 368,01
m	Perfil de Cierre superior de aluminio	0,17	\$ 1.559,71
kg	Mortero	10,8	\$ 6.735,31
m <sup>2</sup>	Panel rígido de poliestireno de 40 mm de espesor	1,05	\$ 6.320,72
Ud	Taco de expansión de polipropileno	8	\$ 1.386,24
m <sup>2</sup>	Malla de fibra de vidrio	1,1	\$ 1.055,41
m	Perfil de esquina para refuerzos	0,3	\$ 228,83
m	Perfil de cierre lateral de 40 mm	0,3	\$ 881,50
kg	Imprimación acrílica	0,2	\$ 455,74
kg	Mortero acrílico	2	\$ 4.605,36
m	Cordón de polietileno expandido	0,17	\$ 8,09
Ud	Cartucho de masilla elastómera	0,02	\$ 134,63
<b>Sub total 1</b>			<b>\$ 23.739,55</b>
Unidad	Mano de Obra	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
h	Maestro 1° Montador de Aislamiento	0,115	\$ 647,30
h	Ayudante montador de aislamientos	0,115	\$ 467,30
h	Maestro 1° Revocador	0,688	\$ 3.761,07
h	Ayudante revocador	0,688	\$ 2.795,69
<b>Sub total 2</b>			<b>\$ 7.671,36</b>
Unidad	Herramientas	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
%	Herramientas	2	\$ 628,22
<b>Sub total 3</b>			<b>\$ 628,22</b>
<b>Total</b>			<b>\$ 32.039,13</b>

Fuente: <http://www.chile.generadordeprecios.info>

Como se observa en la tabla 3-3, el precio a cobrar por cada m<sup>2</sup> de recubrimiento en aislación para el pabellón 2, debe ser de \$32.039 CLP. Considerando un área para el pabellón 2 de 130 m<sup>2</sup> aproximadamente en total, el costo total para la instalación del recubrimiento es de \$4.165.070 CLP, lo que se aproxima a \$4.200.000 CLP.

Para el caso de la aislación, se tiene que para el pabellón número 2 el espesor de la aislación es mayor en comparación con el pabellón 1 y 3, por lo que el precio de la instalación solo se vería afectado por el costo del material necesario. Nuevamente se vuelve a consultar a la página mencionada anteriormente para obtener el precio de la instalación por cada m<sup>2</sup> tanto en el pabellón 2 como en el pabellón 1 y 3.

Tabla 3-4 Valor para aislación en cubierta de pabellón 2

Unidad	Material	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
m <sup>2</sup>	Lana mineral en 140 mm de espesor	1,1	\$ 8.303,33
M	Cinta autoadhesivas para sellado de juntas	1	\$ 272,09
<b>Sub total 1</b>			<b>\$ 8.575,42</b>
Unidad	Mano de obra	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
H	Maestro 1° montador de aislamientos	0,077	\$ 433,41
H	Ayudante montador de aislamientos	0,077	\$ 312,89
<b>Sub total 2</b>			<b>\$ 746,30</b>
Unidad	Herramientas	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
%	Herramientas	2	\$ 186,43
<b>Sub total 3</b>			<b>\$ 186,43</b>
<b>Total</b>			<b>\$ 9.508,15</b>

Fuente: <http://www.chile.generadordeprecios.info>

Tabla 3-5 Valor para aislación en cubierta de pabellón 1 y 3

Unidad	Material	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
m <sup>2</sup>	Lana mineral en 80 mm de espesor	1,1	\$ 5.022,64
M	Cinta autoadhesivas para sellado de juntas	1	\$ 272,09
<b>Sub total 1</b>			<b>\$ 5.294,73</b>
Unidad	Mano de obra	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
H	Maestro 1° montador de aislamientos	0,077	\$ 433,41
H	Ayudante montador de aislamientos	0,077	\$ 312,89
<b>Sub total 2</b>			<b>\$ 746,30</b>
Unidad	Herramientas	Cantidad	Precio/m <sup>2</sup>
%	Herramientas	2	\$ 120,82
<b>Sub total 3</b>			<b>\$ 120,82</b>
<b>Total</b>			<b>\$ 6.161,85</b>

Fuente: <http://www.chile.generadordeprecios.info>

Todos los precios mostrados en las tablas 3-3, 3-4 y 3-5 están sujetos al valor del dólar en el mes de Julio del 2019 (\$686,06 promedio), por lo que el valor real en el tiempo debe estar sujeto a reajuste dependiendo de éste.

Dado los precios por cada m<sup>2</sup> para la instalación de aislación en la cubierta de ambos espesores, y considerando el área que se debe cubrir en cada caso, se tiene que para el pabellón 2 la inversión en aislación para su cubierta es de \$1.911.898 CLP, y para los pabellones 1 y 3 en conjunto la inversión es de \$2.480.172 CLP. La suma de ambas inversiones para la aislación de cubiertas en todos los pabellones, da un total aproximado de \$4.400.000 CLP, lo que finalmente da una inversión total de \$8.600.000 CLP para la mejora de aislación total con el fin de cumplir con los estándares propuestos por la TDRe. Finalmente se agrega un coeficiente de seguridad a la inversión de un 5% del total para amortiguar cualquier posible contingencia, por lo que la inversión final para la mejora en aislación será aproximadamente de \$9.000.000 CLP.

Para ver el impacto que se tiene en los costos que se manejan anualmente para el sistema de calefacción, se toma en consideración la nueva demanda que se tiene debido a

la mejora en la aislación, y se hace la respectiva proyección considerando nuevamente los parámetros involucrados que ya se han visto con anterioridad (Ver punto 2.5).

Tabla 3-6 Resumen de Costos Para el sistema de calefacción con aislación mejorada en Liceo

	<i>Tarifa por kWh (\$)</i>	<i>Tarifa por demanda máxima (\$)</i>	<i>Tarifa de cargo fijo por cada kW (\$)</i>	<i>Cargo fijo administrativo (\$)</i>	<i>Total (\$)</i>
<i>Marzo</i>	70.772	160.698	311	2.974	234.755
<i>Abril</i>	96.300	160.698	423	2.974	260.395
<i>Mayo</i>	140.797	170.151	618	2.974	314.540
<i>Junio</i>	178.424	217.416	783	2.974	399.597
<i>Julio</i>	49.380	207.963	217	2.974	260.534
<i>Agosto</i>	150.910	179.604	663	2.974	334.151
<i>Septiembre</i>	104.955	162.109	461	2.974	270.499
<i>Octubre</i>	101.074	151.246	444	2.974	255.738
<i>Noviembre</i>	49.836	122.887	219	2.974	175.916
<i>Diciembre</i>	17.857	9.453	78	2.974	30.362

Fuente: Elaboración Propia en base a Tarifas eléctricas

Se estima en base a la proyección, que los costos anuales para el sistema de calefacción en el Liceo Altos del Mackay con la mejora en aislación propuesta, bajarían aproximadamente a \$2.500.000 CLP, lo que implica una reducción de \$500.000 respecto al sistema que se tenía con anterioridad, lo que significa una reducción del 16,6% en costos anuales.

### 3.3 DISEÑO PARA MEJORA CON RECUPERADORES DE CALOR

La propuesta para esta opción, consiste principalmente en instalar recuperadores de calor, que es un aparato que nos permite recuperar parte de la energía en forma de calor que se encuentra en el aire climatizado. El aparato funciona mediante ventilación mecánica del aire al interior y exterior, que a través de un intercambiador de calor, pone en contacto el aire calentado al interior, y cede calor al aire exterior que ingresa sin entrar en contacto y sin que se mezcle el aire de los dos circuitos.

Este aparato tiene la principal ventaja de que permite bajar el consumo energético de los equipos de manera considerable, y al mismo tiempo mantener la calidad en salubridad del aire. Se presenta convencionalmente como una caja con embocaduras por donde circula el aire, y en su interior se encuentran los ventiladores para la impulsión en ambos sentidos del flujo y filtros de aire.

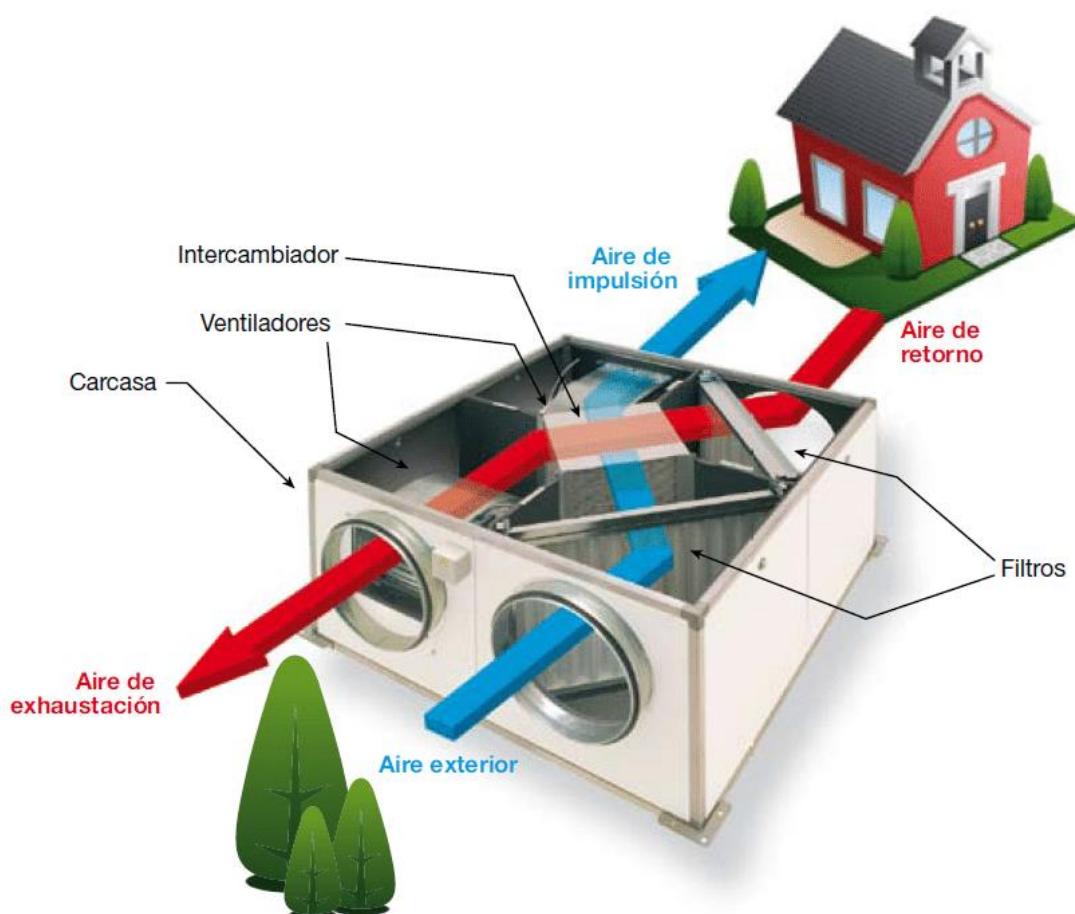


Figura 3-3 Esquema típico para recuperador de calor de flujos cruzados

Fuente: Google Imágenes

Convencionalmente se ocupan dentro de una red de tuberías que hacen circular el aire en una línea matriz principal de impulsión, y otra para el retorno, donde los recuperadores se colocan en las distintas habitaciones para climatizar. Este sistema

requiere una instalación compleja, y no es motivo del trabajo realizar un sistema completamente nuevo por lo que se escapa de la dimensión que pretende una mejora a un sistema ya instalado. Debido a esto se consideran instalar recuperadores de calor individuales, recuperadores que no requieren un sistema de distribución por tuberías, y la instalación es bastante simple donde solo se requiere un punto de conexión eléctrica.

Como se menciona anteriormente, la TDR establece que el caudal de aire necesario para la calidad del aire al interior de las salas debe ser de 5 L/s por cada persona al interior del recinto (Ver punto 2.2). Estimando un caudal necesario de al menos 125 L/s, es decir 34,7 m<sup>3</sup>/h, se dimensiona un recuperador de calor que cumpla con dicha condición para el espacio que cubren las salas. Se considera un recuperador de calor marca *Blauberg* modelo *FRESHBOX 60*, con capacidad de hasta 60 m<sup>3</sup>/h, un rango de temperaturas de -20 °C hasta 50 °C. La instalación del equipo se hace mediante una fijación en la pared, donde se hacen aberturas para las tuberías que intercambian calor en el interior del equipo.

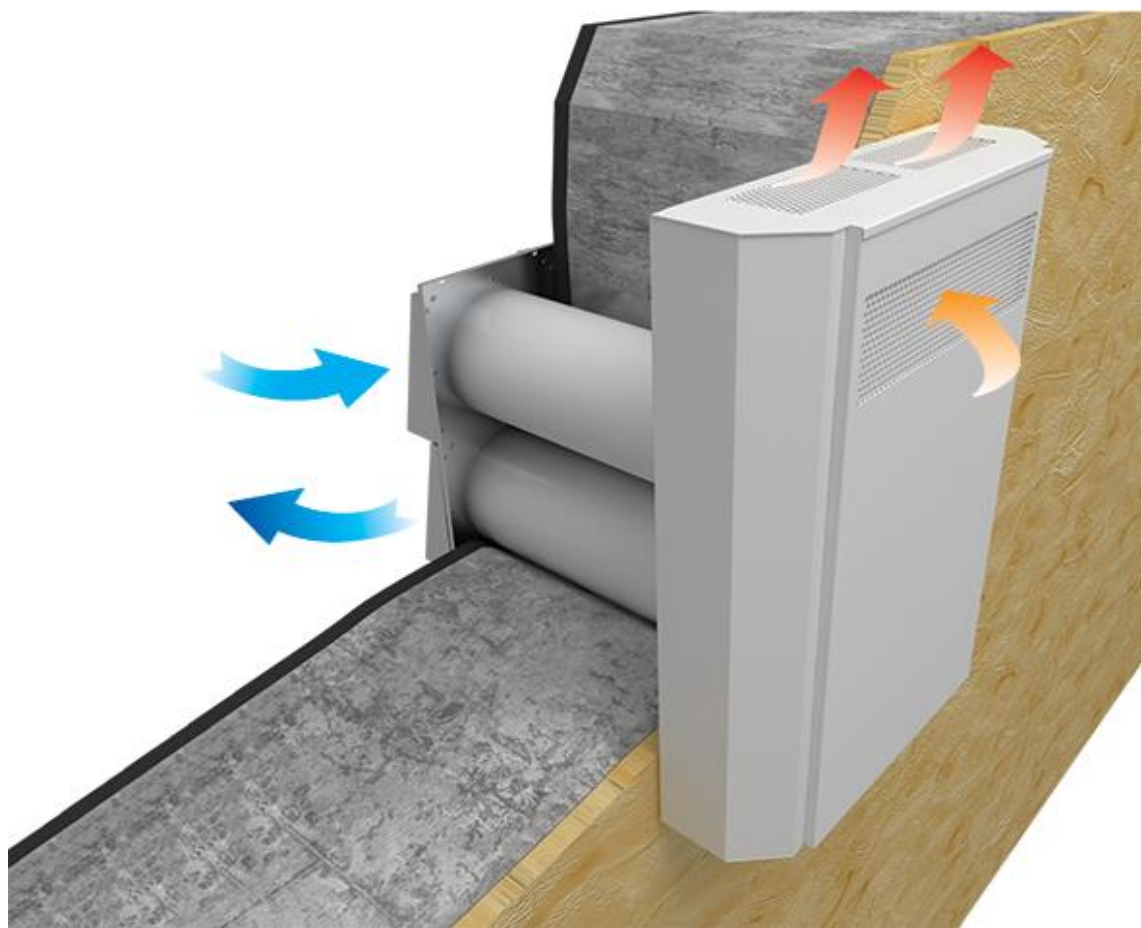
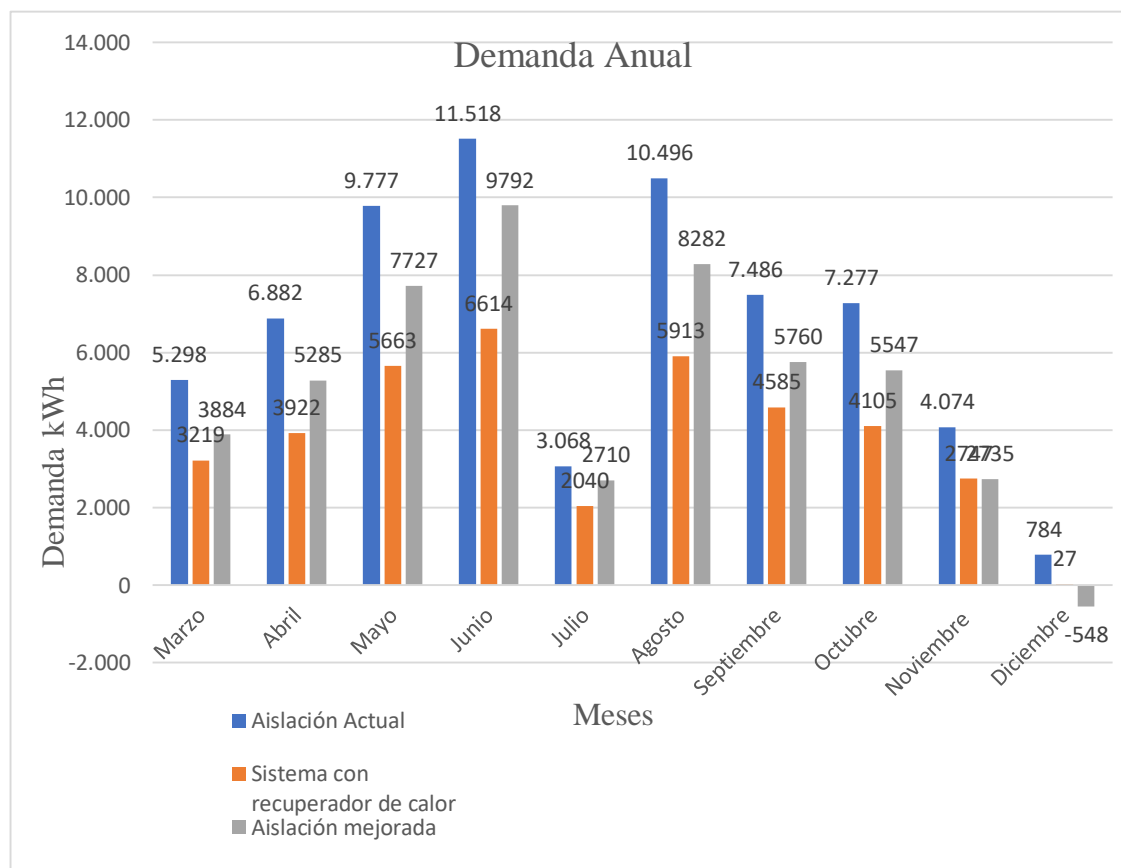


Figura 3-4 Instalación de FRESHBOX 60  
Fuente: Ficha Técnica FRESHBOX 60

Para estimar como los equipos influyen en el sistema de calefacción, se debe entender que los recuperadores de calor conceptualmente van a ir disminuyendo las pérdidas de energía que se tienen, en este caso, debido al caudal por renovación de aire debido a que ahora pasa a ser un proceso controlado. Es debido a esto, a que tomando en

cuenta que la velocidad de trabajo 1 del recuperador de calor es muy similar al caudal de aire que establece la norma (30 m<sup>3</sup>/h y 34 m<sup>3</sup>/h respectivamente), el fabricante nos asegura una eficiencia térmica de trabajo de hasta un 79%. Debido a que esta cifra se alcanza en el mejor de los casos, y debido al propio desgaste del equipo con el pasar del tiempo el rendimiento disminuye, es preferible proyectar la eficiencia con un porcentaje menor para asegurar una fiabilidad en la eficiencia más conservadora, por lo que se elige proyectarla al 70%.



Gráfica 3-2 Comparación de eficiencia con distintas opciones de mejora

Fuente: Elaboración Propia en base a cálculos

Se estima que en promedio, la eficiencia del sistema mejora en un 40% debido a que la mayor pérdida de energía se tiene debido a este concepto, por lo que controlar y ser capaz de aprovechar este punto tiene un gran impacto en el sistema.

Para estimar la inversión del costo es necesario saber cuánto cuestan los equipos, y la instalación de los mismos. Se hacen las cotizaciones de los equipos para saber un estimativo de cuanto debe ser la inversión inicial, y la instalación de los mismos. Tomando en cuenta lo simple de la instalación, debido a que solo se necesitan hacer las perforaciones en los muros, y la fijación correcta del aparato, es que se toma un valor a partir nuevamente de la página consultada [generadordeprecioschile.info](http://generadordeprecioschile.info), por lo que el costo de inversión para instalar recuperadores de calor murales de sistema descentralizado vendrá dado por la cotización dada de los equipos y los costos de la instalación consultado en la página. Por último, tomando en cuenta que los equipos se cotizan desde una empresa española, es

necesario estimar el costo de envío desde ese país, hasta la ciudad de Coyhaique donde se instalarán, esto debido a que no es posible encontrar estos equipos dentro del mercado nacional. Se toma como fuente de información, el simulador de costos que presenta la empresa [Fedex](#), tomando en consideración la cantidad y peso de los equipos nos arroja un valor de \$1.192.868,82 CLP, lo que finalmente se aproxima a \$1.200.000 CLP, por lo que el costo unitario por instalación, envío y compra de los equipos de resume en la siguiente tabla.

Tabla 3-7 Costos unitarios para instalación de Equipos Recuperadores de Calor

Unidad	Material	Cantidad	Precio Unitario
-	Recuperador de calor FRESHBOX 60	1	\$ 340.963
<b>Sub total 1</b>			<b>\$ 340.963</b>
Unidad	Mano de Obra	Cantidad	Precio Unitario
-	Maestro 1° instalador de climatización	1	\$ 12.457
-	Ayudante instalador de climatización	1	\$ 8.334
<b>Sub total 2</b>			<b>\$ 20.791</b>
Unidad	Herramientas	Cantidad	Precio Unitario
%	Herramientas	2	\$ 7.235
<b>Sub total 3</b>			<b>\$ 7.235</b>
Unidad	Envío	Cantidad	Precio Unitario
-	Envío de Equipos	1	\$ 110.000
<b>Sub total 4</b>			<b>\$ 110.000</b>
<b>Total</b>			<b>\$ 478.989</b>

Fuente: Elaboración Propia junto a estimaciones de generador de precios Chile

Todos los precios mostrados en la tabla 3-7 están sujetos al valor del dólar en el mes de Julio del 2019 (\$686,06 promedio), por lo que el valor real en el tiempo debe estar sujeto a reajuste dependiendo de éste.

Tomando en cuenta el costo unitario de inversión de cada equipo, y considerando un total de 11 equipos (uno para cada sala), se llega a que el total de la inversión que se debe realizar es de \$5.268.879 CLP. Se agrega un coeficiente de seguridad ante cualquier contingencia para los costos de un 10% del total, por lo que la inversión final será de \$5.795.766 CLP lo que se aproxima a un total de \$5.800.000 CLP.

Por último, se proyectan los costos dada las nuevas demandas térmicas que se tienen por concepto en la instalación de los recuperadores de calor. Se toman en cuenta los consumos de la bomba de calor, equipos fan coil, las bombas de circulación y ahora los recuperadores de calor. Se toman en consideración nuevamente los valores de la tarifa BT4 que corresponden a la tarifa regente en el Liceo Altos del Mackay (Ver Tabla 2-7), a modo de ver la comparación en los costos anuales que se tienen sin los recuperadores de calor.

Tabla 3-8 Costos anuales en sistema con recuperadores de Calor

	Tarifa por kWh (\$)	Tarifa por demanda máxima (\$)	Tarifa de cargo fijo por cada kW (\$)	Cargo fijo administrativo (\$)	Total (\$)
Marzo	58.655	94.245	258	2.974	156.131
Abril	71.464	98.215	314	2.974	172.967
Mayo	103.188	98.688	453	2.974	205.303
Junio	120.517	133.947	529	2.974	257.966
Julio	37.172	125.534	163	2.974	165.843
Agosto	107.743	106.155	473	2.974	217.346
Septiembre	83.545	98.215	367	2.974	185.101
Octubre	74.799	88.573	328	2.974	166.675
Noviembre	49.198	71.747	216	2.974	124.135
Diciembre	492	56.849	2	2.974	60.318

Fuente: Elaboración Propia en base a tarifas eléctricas

Se tiene que el costo total anual para el sistema de calefacción por geotermia, considerando ahora el impacto de los recuperadores de calor, asciende al valor de \$1.711.784 CLP. Este dato en contraste con el sistema sin recuperadores, presenta un ahorro del 42% en costos para el funcionamiento del sistema de climatización.

Dado los resultados en ambas propuestas para la mejora del diseño, se procede a mostrar una comparación simple de ambas propuestas para contrastar resultados expuestos y analizar los factores indicativos de cual propuesta propone mejores soluciones.

Dentro de los distintos parámetros en exposición, la evaluación en criterios de complejidad para la instalación de las distintas propuestas vendrá dada a partir de la siguiente matriz de decisión.

Tabla 3-9 Matriz de Decisión para la dificultad del proyecto

	Menos de una semana	Mas de una semana	Mas de un mes
1-2 trabajadores	Poco complejo	Poco complejo	Medianamente complejo
3-6 trabajadores	Poco complejo	Medianamente complejo	Alta complejidad
7 o mas	Medianamente complejo	Alta complejidad	Alta complejidad

Fuente: Elaboración Propia

Es de considerar el hecho de que las decisiones tomadas en la matriz de decisión de la tabla 3-9 es una idea simple en base a experiencia propia del grado de dificultad de las propuestas, y que en la realidad puede diferir.

Para la propuesta de mejora en aislación, se considera un total de 2 trabajadores, debido en principal medida a que la dificultad del trabajo se concentra en el revestimiento de la aislación para las paredes del pabellón 2, y que las mejoras en aislación para las cubiertas de los techos, la instalación es en sí misma simple. Tomando un plazo estimativo de entre 2 a 3 semanas como tope para la finalidad del trabajo, se caería en la categoría de trabajo poco complejo.

Del mismo modo, para la propuesta en la instalación de los recuperadores de calor, solo se requiere de la instalación propiamente tal de los equipos, por lo que se consideran también solo a 2 trabajadores, debido a la cantidad de equipos a instalar. Con un plazo tope de una semana, el trabajo cae en la categoría de poco complejo nuevamente.

A continuación, se muestra la tabla resumen para los distintos parámetros considerados en ambas propuestas:

Tabla 3-10 Resumen comparativo entre ambos proyectos

	Propuesta en Aislación	Propuesta en Recuperador de Calor
Mejora de Eficiencia en sistema (%)	22%	40%
Inversión (\$)	\$9.000.000 (sujeto a valor del dólar)	\$5.800.000 (sujeto a valor del dólar)
Ahorro en Costos del Funcionamiento del Sistema (%)	16,6%	42%
Ahorro en Costos de funcionamiento del Sistema (\$)	\$500.000 aprox.	\$1.290.000 aprox.
Cantidad de Mano de Obra (-)	2 Instaladores	2 Instaladores
Tiempo Estimado de Obra (-)	2-3 semanas	1 semana
Complejidad de Instalación (-)	Poco Complejo	Poco Complejo

Fuente: Elaboración Propia

Se logra apreciar que dentro de los distintos parámetros que se obtuvieron en resultado, la propuesta en la instalación de los recuperadores de calor presenta mejores condiciones para la implementación que respecto a la contraparte en la propuesta para mejora en aislación. La propuesta en recuperadores de calor, obtiene en base a simulaciones, mejor porcentaje de eficiencia para el sistema, debido a que logra controlar en mejor medida la variable que más pérdida de calor genera, con un 40% de mejora en eficiencia frente al 22% que se tiene por la otra propuesta (Ver gráfico 3-2). Esto implica también un ahorro en costos sustancial, debido a que se debe generar menos calor para obtener el mismo resultado en climatización, obteniendo como recompensa un ahorro energético, ya que la propuesta en instalación de recuperadores de calor, es capaz de

amortiguar hasta \$1.290.000 aproximadamente en costos anuales, frente a los \$500.000 que se obtiene de la otra propuesta en mejora en aislación. Al mismo tiempo los tiempos considerados, y los costos en mano de obra son más baratos para la instalación de los recuperadores de calor, frente al trabajo de revestir los muros y techos con aislación estructural. Por último, la inversión que se debe realizar para materializar ambas propuestas, es menor en el caso de la instalación de equipos que respecto a la propuesta de mejora en aislación, siendo la primera un 35% más barata que la segunda.

Como síntesis del análisis, se tiene que la propuesta en recuperadores de calor es más fácil de realizar, se termina en menor tiempo, presenta mejores resultados para la eficiencia del sistema, y es más barata de implementar, por lo que se debiera optar en primera instancia en escoger dicha propuesta por sobre la anterior.

## CONCLUSIÓN

Actualmente en la ciudad de Coyhaique existe una problemática importante en materia de medio ambiente, que tiene una directa relación con el tipo de combustible que se ocupa como calefacción en la mayoría de los hogares de la ciudad. Esta situación ha llegado a puntos donde se ha declarado varias veces alertas ambientales, donde distintas organizaciones y empresas hacen esfuerzos por cambiar la cultura de la leña como medio de calefacción que cada año se acrecienta en la zona.

A partir de este hecho, se han generado normas y estándares que pretenden intervenir en la calidad de distintos aspectos asociados a la climatización, a modo de buscar soluciones que con el tiempo terminen por reemplazar la leña como combustible de calefacción. El proyecto estudiado en este informe, busca innovar en la ciudad con tecnologías que ocupa recursos amigables con el ambiente y que son renovables, con el fin de presentar los cálculos y condiciones técnicas asociadas al sistema.

En base al trabajo de investigación, asociado a los distintos elementos que intervienen dentro del dimensionamiento de la bomba de calor como elemento fundamental del sistema de climatización, es posible determinar que la elección de la bomba de calor, así como de la cantidad de potencia necesaria para suministrar al sistema es suficiente para las demandas propias que presentan las características propias del colegio. Es importante aclarar, que si bien los datos muestran que en situaciones puntuales la demanda sobrepasa la potencia térmica que es capaz de entregar la bomba de calor, colocar otra bomba por un margen muy pequeño elevaría demasiado tanto la inversión como los costos por lo que no es justificable ese punto, dando a entender que es preferible por un tema económico que la capacidad sea rebasada muy levemente durante períodos puntuales de tiempo.

En cuanto a las propuestas de mejora, se logra apreciar claramente los impactos que tienen ambas propuestas en el sistema de climatización y como estos afectarían a los costos que se tienen anualmente. Al hacer la comparación entre uno y otro, se ve claramente las ventajas competitivas que presenta la propuesta en la instalación de Recuperadores de Calor respecto a la propuesta en mejora de Aislación, siendo que los Recuperadores de calor presentan un mejor impacto en el sistema mejorando notablemente la eficiencia y disminuyendo los costos anuales en un 42%, donde al mismo tiempo presentan una inversión inicial más barata respecto que la mejora en aislación. Dado esto, se recomienda la implementación de la segunda propuesta de mejora, debido a que controla la variable que demanda más potencia térmica dentro del sistema, que es el caudal por renovación de aire, y permite al mismo tiempo reaprovechar la energía que se está escapando y permitir una correcta ventilación de las salas de clases.



## **BIBLIOGRAFÍA**

AGROMET. Red Agrometeorológica de Inia. [en línea] <<http://agromet.inia.cl/index.php>> [consulta: 23 Abril 2019].

Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. Almería, España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). 2008. 66 p.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. [en línea]. 25 Mayo 1998. <[www.leychile.cl/Navegar?idNorma=99434](http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=99434)>

BUSTAMANTE G, Waldo. ROZAS U, Yoselin: Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social [diapositivas]. Santiago, Chile: División técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Programa de Eficiencia Energética, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2009. 203 diapositivas, col. II Tecnología de la Construcción.

CENGEL, Yunus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. 7ª Ed. México: McGraw-Hill, 2012. 1009 p. ISBN: 978-607-15-0743-3

CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de Calor y Masa. 4ª Ed. México: McGraw-Hill, 2011. 920 p. ISBN: 978-607-15-0540-8

GENERADOR DE PRECIOS. Generador de Precios de la Construcción. [en línea] <<http://www.chile.generadordeprecios.info>> [consulta: 10 Julio 2019]

HOMEMICRO. BUFFER VESSEL CAPACITY. [en línea] 2016, Marzo 13. <[http://www.homemicro.co.uk/lzc\\_vessel.html](http://www.homemicro.co.uk/lzc_vessel.html)> [consulta: 08 Mayo 2019].

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Acondicionamiento Térmico – Envoltorio Térmico de Edificios – Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas. NCh. 853. Of. 2007. Santiago, Chile: 2007. 43 p.

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Arquitectura y Construcción – Zonificación Climático Habitacional para Chile y recomendaciones para el Diseño Arquitectónico. NCh. 1079. Of. 2008. Santiago, Chile: 2008. 38 p.

Memoria Sistema de Climatización en Coyhaique. Santiago, Chile: CEGA, 2019. 58 p.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN DE ARQUITECTURA. Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipologías de Edificios. TDR. 2016. Santiago, Chile: 2016. 298 p.

MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., HUEBSCH, Wade W., ROTHMAYER, Alric P. Fundamentals of Fluids Mechanics 7ª Ed. Estados Unidos. John Wiley & Sons, Inc. 2013. 747 p. ISBN: 978-1-118-11613-5

SOCIEDAD AUSTRAL DE ELECTRICIDAD S.A. Saesa [en línea]. 1995. <<https://www.gruposaes.cl/>>



**ANEXOS****ANEXO 1: BOMBA DE CALOR ECOFOREST**

## Ficha técnica bomba de calor Ecoforest

SPECIFICATIONS ecoGEO B/C 5-22		UNITS	B/C 1	B/C 2	B/C 3	B/C 4
APPLICATION	Place of installation	-	Indoors			
	Type of brine system	-	Ground source / Air source / Hybrid			
	Heating	-	✓	✓	✓	✓
	High Temperature Recovery (HTR) system	-	✓	✓	✓ <sup>support</sup>	✓ <sup>support</sup>
	Integrated Active cooling	-	-	-	✓	✓
	Integrated Passive cooling	-	-	✓	-	✓
PERFORMANCE	Modulation range of the compressor	%	20 to 100			
	Heating power <sup>2</sup> , B0W35	kW	5,8 to 25			
	COP <sup>2</sup> , B0W35 <sup>10</sup>	-	4,9			
	Active cooling power <sup>2</sup> , B35W7	kW	-	6 to 22		
	EER <sup>2</sup> , B35W7	-	-	5		
	Max. DHW temperature without support	°C	63			
	Max. DHW temperature with support <sup>3</sup>	°C	70			
	Noise emission level <sup>6,10</sup>	db	35 to 46			
	Energy label / $\eta_p$ with average climate control <sup>10</sup>	-	A+++ / 187%			
OPERATION LIMITS	Distribution / Set heating outlet temperature range	°C	10 to 60 / 20 to 60			
	Distribution / Set cooling outlet temperature range	°C	4 to 35 / 7 to 25			
	Brine inlet temperature range	°C	-25 to +35			
	Brine outlet temperature in cooling mode range	°C	10 to 60			
	Refrigerant circuit pressure min / max	bar	2 / 45			
	Production / Pre-load circuit pressure	bar	0,5 to 3 / 1,5			
	Brine / Pre-load circuit pressure	bar	0,5 to 3 / 0,7			
	Maximum DHW storage tank pressure	bar	8 (only for ecoGEO C)			
WORKING FLUIDS	R410A Refrigerant load without HTR / with HTR	kg	1,7 / 2		2	
	Compressor oil type / load	kg	POE / 1,18			
CONTROL ELECTRICAL DATA	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓			
	Maximum recommended external protection <sup>9</sup>	A	C16A			
	Transformer primary circuit fuse	A	0,5A			
	Transformer secondary circuit fuse	A	2,5			
ELECTRICAL DATA: SINGLE-PHASE	1/N/PE 230 V / 50-60 Hz <sup>8</sup>	-	✓			
	Maximum recommended external protection <sup>9</sup>	A	C50A			
	Maximum consumption <sup>2</sup> , B0W35	kW/A	5,6 / 28,2			
	Maximum consumption <sup>2</sup> , B0W55	kW/A	7,8 / 39,2			
	Starting current min/max <sup>7</sup>	A	6,1 / 15,7			
	Correction of cosine $\phi$	-	0,96 / 1			
ELECTRICAL DATA: THREE-PHASE	3/N/PE 400 V / 50-60Hz <sup>8</sup>	-	✓			
	Maximum recommended external protection <sup>9</sup>	A	C20A			
	Maximum consumption <sup>2</sup> , B0W35	kW/A	5,6 / 8			
	Maximum consumption <sup>2</sup> , B0W55	kW/A	7,8 / 11,2			
	Starting current min/max <sup>7</sup>	A	2 / 5,2			
	Correction of cosine $\phi$	-	0,96-1			
DIMENSIONS/WEIGHT	Height x width x depth	mm	ecoGEO B: 1060x600x710 · ecoGEO C: 1804x600x710			
	Empty weight (without assembly)	kg	B 185 · C 247	B 193 · C 255	B 185 · C 247	B 193 · C 255

Fuente: Ecoforest

**ANEXO 2: FAN COIL MKG 600 B**

## Ficha técnica Fan coil MKG 600 B

## Wall Mounted (S Panel)



Model			MKG-250-B	MKG-300-B	MKG-400-B	MKG-500-B	MKG-600-B
Power supply		V/Ph/Hz	220-240/1/50				
Air flow (H/M/L)		m <sup>3</sup> /h	425/390/350	510/470/390	680/550/460	850/745/620	1020/915/780
		CFM	250/230/205	300/275/230	400/325/270	500/440/365	600/540/460
Cooling	Capacity (H/M/L)	kW	2.63/2.41/2.16	2.97/2.47/2.12	3.28/2.83/2.41	4.25/3.85/3.32	5/4.47/3.97
	Water flow rate	l/h	452	511	564	731	860
	Water pressure drop	kPa	29.4	35.6	43.5	31.8	42.5
Heating	Capacity (H/M/L)	kW	3.36/3.1/2.79	3.91/3.26/2.77	4.37/3.73/3.17	5.81/5.17/4.43	6.7/6/5.28
	Water pressure drop	kPa	27.3	32.9	40.8	30.2	39.7
Power input (H/M/L)		W	24/19/17	37/29/26	40/32/28	50/40/35	66/53/46
Sound pressure level		dB(A)	30/24/20	35/29/24	37/31/26	39/33/28	40/34/29
Fan motor	Type	Low noise 3-speed fan motor					
	Quantity	1					
Fan	Type	Tangential fan					
	Quantity	1					
Coil	Row	2					
	Max. working pressure	MPa	1.6				
	Diameter	mm	Ø7				
Net dimensions (WxHxD)		mm	915x290x230	915x290x230	915x290x230	1072x315x230	1072x315x230
Packing size (WxHxD)		mm	1020x390x315	1020x390x315	1020x390x315	1180x415x315	1180x415x315
Net weight		kg	13	13	13.3	15.8	15.8
Gross weight		kg	16.3	16.3	16.7	19.4	19.4
Water inlet/outlet pipe		Inch	G3/4				
Drain pipe		mm	ODØ20				

Fuente: MIDEA

**ANEXO 3: BOMBAS DE CIRCULACIÓN****Ficha técnica: TOP-S 30/10 (1~230 V, PN 10)**

<b>Materiales</b>		<b>Datos de funcionamiento</b>	
Eje	1.4034, X46Cr13	Temperatura máxima del fluido T	130 °C
Carcasa de la bomba	5.1300, EN-GJL-200	Temperatura mínima del fluido T	-20 °C
Material del cojinete	Carbon, metal impregnated	Presión máxima de trabajo	10 bar
<b>Datos del motor</b>		<b>Dimensiones de instalación</b>	
Emisión de interferencias	EN 61000-6-3	Conexión de tubería del lado de aspiración	DN 32
Resistencia a interferencias	EN 61000-6-2	Longitud entre roscas	180 mm
Alimentación eléctrica	1~230 V, 50 Hz		
Consumo de potencia P1 (Q = máx.) del rodete seleccionado * Número de bombas	390 W		
Velocidad máxima	2700 rpm		
Intensidad nominal I <sub>N</sub>	1.91 A		
Tipo de protección	IPX4D		
<b>Información de pedidos</b>			
Peso neto aproximado	6 kg		
Marca	Wilo		
Denominación del producto	TOP-S 30/10 (1~230 V, PN 10)		
Descripción	2066132		

Ficha técnica Bomba de Circulación Wilo TOP S 30/10

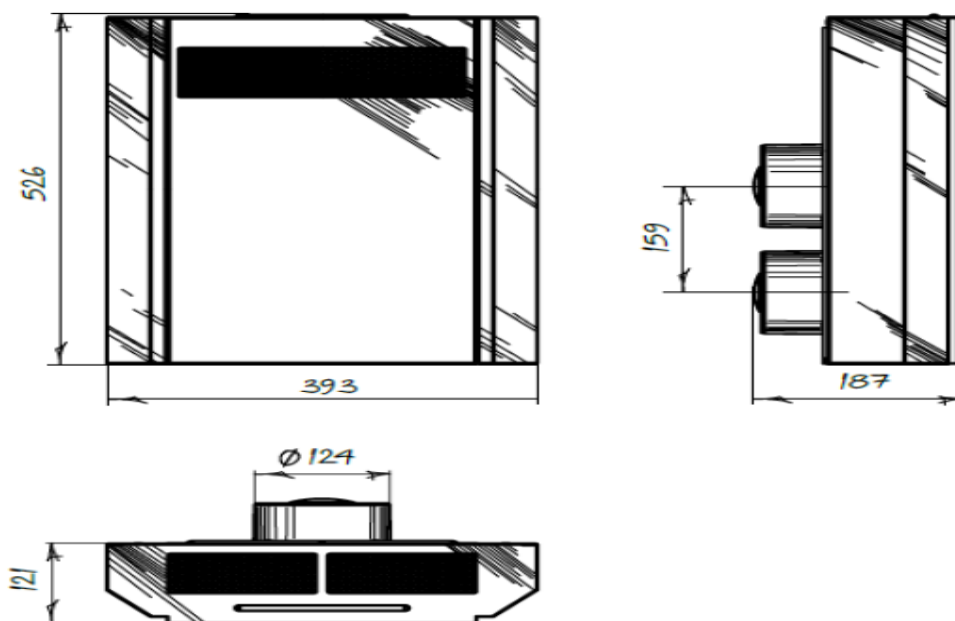
Fuente: Wilo

**ANEXO 4: RECUPERADORES DE CALOR**

Ficha técnica recuperador de calor FRESHBOX 60

Parámetros	FRESHBOX 60		
Voltaje / 50-60 Hz [V]	100-240		
Velocidad	1	2	3
Potencia [W]	4.2	9.6	15.4
Corriente [A]	0.02	0.04	0.07
Flujo de aire [m <sup>3</sup> /h]	30	45	60
RPM	1165	1720	2685
Nivel de ruido [dB(A)]	22	25	29
Máx. temperatura del aire transportado [°C]	desde -20 hasta +50		
Filtro extracción/admisión	G2		
Eficiencia recuperación de calor [%]	79	74	70
Clase SEC	B		
Tipo intercambiador de calor	contra-flujo		
Material del intercambiador de calor	Poliestireno		
Peso [kg]	10.3		
Clase SEC	B		

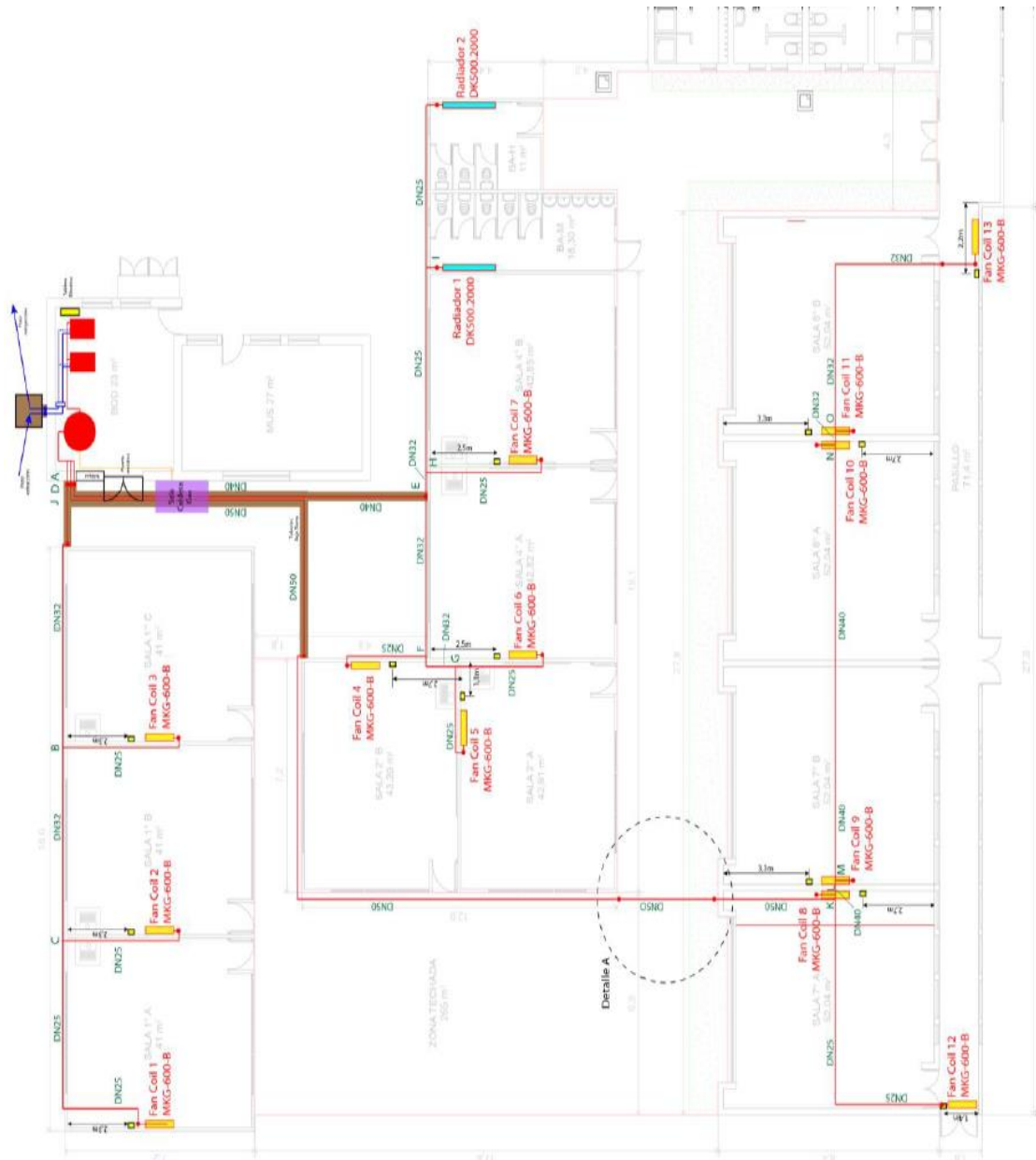
Fuente: Blauberg Ventilatoren GmbH



Dimensiones de Recuperador de Calor FRESHBOX 60

Fuente: Ficha técnica FRESHBOX 60

## ANEXO 5: DISTRIBUCIÓN DE LAS REDES DE AGUA



Plano de distribución de las redes de Agua por el Liceo

Fuente: CEGA