

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA GARANTIZAR EL CONFORT  
TÉRMICO EN ESTABLECIMIENTOS EDUCACIONALES: CASO APLICADO Y  
PROPUESTA DE MEJORA A COLEGIO PLAZUELA DE LO MIRANDA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**PABLO IGNACIO ACEVEDO DEL RÍO**

**PROFESOR GUÍA**

**FRANCISCO DALL'ORSO LEÓN**

**SANTIAGO, NOVIEMBRE DE 2020**

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres Pablo y Cecilia, por la educación y oportunidades que me han brindado durante mi vida. Por su acompañamiento y apoyo permanente durante todo este periodo universitario.

A Francisca, por todas sus enseñanzas y su apoyo constante e incondicional durante los últimos años y en especial durante el desarrollo del presente trabajo de tesis. Recorrer la vida universitaria juntos nos permitió potenciarnos mutuamente, superar importantes desafíos académicos y merecer con creces este importante logro.

A mi profesor guía Francisco, por creer en el potencial de esta tesis cuando era tan solo una idea y por su constante buena disposición para apoyar el desarrollo de este trabajo.

A la Dirección del Colegio Plazuela, por su buena recepción y disposición a colaborar con este trabajo.

## RESUMEN EJECUTIVO

Desde hace muchos años, la ausencia de confort térmico en los establecimientos educacionales, principalmente en las temporadas de otoño e invierno, es un problema que aparece en todos los medios de comunicación. Especialmente en las zonas centro, sur y austral de Chile, existen escenarios precarios que dificultan las actividades escolares de los estudiantes. Las manifestaciones de los profesores, apoderados y los mismos jóvenes, sumados a paros indefinidos y protestas, han marcado la agenda de una problemática que se repite año a año y que aún está lejos de solucionarse de raíz.

En el presente trabajo se realiza un análisis para identificar cuáles son las condiciones ambientales necesarias para poder llevar a cabo un correcto desarrollo del proceso de aprendizaje de los estudiantes. Una vez identificados los requerimientos de un ambiente que alcanza un confort térmico, se identifican las variables principales que deben ser adecuadamente gestionadas a fin de poder garantizar dicho confort, tanto a estudiantes como también a docentes. Mediante este estudio y basado en la realización de un balance energético, se define que las variables más determinantes son: la pérdida de calor a través de la envolvente del edificio (Q), las pérdidas de calor por ventilación (V), las ganancias solares (Gs) y las ganancias internas (Gi).

Con motivo de evaluar el funcionamiento e impacto de cada una de estas variables y de poder proponer soluciones concretas al problema identificado, se trabaja en base a un caso aplicado, tomando como modelo para este ejercicio la infraestructura del Colegio Plazuela de la localidad de Lo Miranda, en la comuna de Doñihue, Región de O'Higgins. Este recinto se ha adjudicado recientemente fondos de Mejoramiento de Infraestructura Escolar Pública entregados por el Ministerio de Educación, recursos con los cuales el establecimiento financia su proyecto de conservación.

En virtud de la información técnica disponible a razón del mencionado proyecto, se analiza si la infraestructura del colegio será capaz de garantizar un confort térmico al interior de sus salas de clases.

Independiente del resultado anterior, se proponen soluciones que aumenten la eficiencia energética del establecimiento, incorporando alternativas de aislación térmica e instalación de fuentes de energía renovable no convencional (ERNC), específicamente paneles fotovoltaicos.

Si bien las propuestas no son rentables económicamente, si representan un impacto positivo para la situación económica del establecimiento y, sobre todo, permiten obtener beneficios muy importantes para la comunidad educativa asociados al alcance del confort térmico: mejorar el rendimiento escolar, que los estudiantes logren mayores niveles de concentración y participación en clases, disminuir los índices de enfermedades debido a constante exposición al frío, disminución de licencias médicas, entre muchas otras. En definitiva, mejorar las oportunidades que tienen los estudiantes para potenciar al máximo sus capacidades y desarrollar, en conjunto con los docentes, un proceso de aprendizaje en un ambiente propicio. Si en Chile se está discutiendo tanto sobre tener educación de calidad, el confort térmico es una de las primeras condiciones que se debería poder garantizar.

## ABSTRACT

For many years, the lack of thermal comfort in educational establishments, mainly in the autumn and winter seasons, has been a problem that appears in all the media. Especially in the central and southern areas of Chile, there are precarious settings that make school activities difficult for students. Demonstrations by teachers, parents and schoolchildren, added to indefinite strikes and protests, have marked the agenda of a problem that is repeated year after year and that is still far from being solved at its roots.

In the present work an analysis is carried out to identify what are the necessary environmental conditions to be able to carry out a correct development of the students' learning process. Once the requirements of an environment that achieves thermal comfort have been identified, the main variables that must be properly managed are identified in order to guarantee said comfort, both for students and teachers. Through this study and based on the realization of an energy balance, it is defined that the most determining variables are: heat loss through the building envelope ( $Q$ ), heat losses through ventilation ( $V$ ), solar gains ( $G_s$ ) and internal gains ( $G_i$ ).

In order to evaluate the operation and impact of each of these variables and to be able to propose concrete solutions to the identified problem, we work based on an applied case, taking as a model for this exercise the infrastructure of the Colegio Plazuela in the town of Lo Miranda, located in the commune of Doñihue, O'Higgins Region. This school has recently been awarded funds for the Improvement of Public School Infrastructure delivered by the Ministry of Education, resources with which the establishment finances its conservation project.

By virtue of the technical information available as a result of the aforementioned project, it is analyzed whether the school's infrastructure will be able to guarantee thermal comfort inside its classrooms.

Regardless of the previous result, solutions are proposed that increase the energy efficiency of the establishment, incorporating alternatives for thermal insulation and installation of non-conventional renewable energy sources (NCRE), specifically photovoltaic panels.

Although the proposals are not economically profitable, they do represent a positive impact on the economic situation of the establishment and, above all, allow obtaining very important benefits for the educational community associated with the achievement of thermal comfort: improving school performance, that students achieve higher levels of concentration and participation in classes, decrease the rates of illness due to exposure to constant cold, decrease in medical licenses, among many others. In summary, improve the opportunities that students have to maximize their abilities and develop, together with teachers, a learning process in a conducive environment. If in Chile there is so much discussion about having quality education, thermal comfort is one of the first conditions that should be guaranteed.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.   PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	1
<b>2.   OBJETIVOS</b> .....	4
<b>2.1 Objetivo General</b> .....	4
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	4
<b>3.   MARCO TEÓRICO</b> .....	31
<b>3.1. Antecedentes del problema</b> .....	31
<b>3.2. Energía en Chile</b> .....	36
<b>3.3. Sistema Educativo en Chile</b> .....	42
<b>3.4. Confort térmico</b> .....	44
<b>3.4.1. Ganancia de calor</b> .....	45
<b>3.4.2. Aislación térmica</b> .....	49
<b>3.4.3. Ventilación</b> .....	50
<b>3.5. Consecuencias de la ausencia de confort térmico</b> .....	51
<b>4.   METODOLOGÍA</b> .....	56
<b>5.   RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	33
<b>5.1 Escenario Proyectado</b> .....	33
<b>5.1.1. Energía a través de la envolvente</b> .....	34
<b>5.1.2. Energía perdida debido a la ventilación del recinto</b> .....	38
<b>5.1.3. Energía ganada debido a radiación solar</b> .....	39
<b>5.1.4. Energía de ganancias internas</b> .....	42
<b>5.1.5. Diferencia entre temperatura interior y exterior del recinto</b> .....	43
<b>5.1.6. Determinación de demanda energética para módulo 1</b> .....	44
<b>5.1.7. Sistema de calefacción y demanda eléctrica</b> .....	45
<b>5.2 Comparación entre escenarios Actual y Proyectado</b> .....	50
<b>5.3. Escenario Propuesto</b> .....	57
<b>5.3.1 Base comparativa</b> .....	58
<b>5.3.2 Sistema de aislación térmica exterior E.I.F.S</b> .....	59
<b>5.3.3 Ventanas con termopanel (DVH)</b> .....	64
<b>5.3.4 Aislación Muro de terciado sur</b> .....	67
<b>5.3.5 Aislación de piso</b> .....	70

<b>5.3.6 Paneles Fotovoltáicos</b> .....	74
<b>5.3.7 Análisis económico y definición de propuesta</b> .....	81
<b>5.3.8 Beneficios de Propuesta final</b> .....	88
<b>6.   CONCLUSIONES</b> .....	97
<b>7.   ANEXOS</b> .....	102
<b>Tabla I:</b> Lista de materiales que componen la envolvente del módulo 1 del Colegio Plazuela.....	102
<b>Tabla II:</b> Detalle de los elementos que componen cada una de las elevaciones de la envolvente del módulo 1, con los valores particulares tanto de área como también de transmitancia térmica. ....	103
<b>Tabla III:</b> Detalle de los valores que permiten calcular el valor de la transmitancia térmica (U) para el muro de ladrillo de carácter heterogéneo. ....	104
<b>Tabla IV:</b> Tabla que muestra el total de las ganancias solares recibidas tanto por los muros y cubiertas como también por las ventanas en las que incide la radiación solar. ....	105
<b>Tabla V:</b> Datos obtenidos mediante la herramienta Explorador Solar de Ministerio de Energía. Se considera la temperatura promedio mensual durante rangos de una hora. ..	105
<b>Tabla VI:</b> Matriz de demanda de energía en forma de calor (en kWh) para mantener temperatura mayor o igual a 20°C. Las celdas sin valor indican que la demanda de calefacción está cubierto por efecto de las ganancias internas y solares. ....	106
<b>Tabla VII:</b> Resumen que muestra de forma mensual y total la demanda energética, la demanda eléctrica y la potencia, tanto para el módulo 1 como también para el colegio completo. Se muestra en negrita los valores más elevados del año para cada variable..	106
<b>Tabla VIII:</b> Sistema de aislación E.I.F.S y sus efectos en distintos parámetros energéticos según cada uno de los muros o soluciones de implementación. ....	107
<b>Tabla IX:</b> Consumo mensual de suministro eléctrico según cada una de las soluciones presentadas de aislación térmica exterior EIFS. ....	107
<b>Tabla X:</b> Comportamiento de la demanda energética, pérdidas de calor por envolvente y ganancias solares por superficies vidriadas (v) y totales (v+o) en función de las distintas soluciones de DVH propuestas. ....	108
<b>Tabla XI:</b> Consumo mensual de suministro eléctrico según cada una de las soluciones presentadas de ventanas con termopanel (DVH). ....	108
<b>Tabla XII:</b> Detalle de la distribución mensual de uso para la energía solar generada y el respectivo consumo mensual requerido de la red de distribución local. ....	109
<b>8.   REFERENCIAS</b> .....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2:</b> Calor ganado por la envolvente mediante la radiación solar. La radiación presentada considera tanto la componente directa como la difusa. Valores corresponden a un promedio por hora de un día promedio para cada mes. Se consideran solo las horas de la jornada escolar (8:00-16:00). .....	40
<b>Tabla 3:</b> Demanda energética en forma de calor y potencia necesaria para mantener la temperatura interior de las salas de clases del módulo 1 a una temperatura de 20°C. ....	45
<b>Tabla 4:</b> Tabla de rendimiento de equipos de aire acondicionado según su etiqueta y modo de operación (refrigeración y calefacción). Fuente: Revista Digital INSEM .....	48
<b>Tabla 5:</b> Valores de las variables principales (Q, V, G <sub>s</sub> y G <sub>i</sub> ) utilizadas para cada módulo, para obtener demanda total de Colegio Plazuela. ....	49
<b>Tabla 6:</b> Tabla de valores máximos (U) y mínimos (R <sub>t</sub> ) que deben tener las estructuras generales que componen la envolvente de un edificio. Lo Miranda corresponde a la zona térmica 3. Fuente: O.G.U.C .....	51
<b>Tabla 7:</b> Tabla construida en base a los precios para clientes con tarifa BT3 de la compañía de distribución eléctrica CGE, empresa que presta servicios de suministro eléctrico al establecimiento Colegio Plazuela. ....	58
<b>Tabla 8:</b> Efectos de la instalación de la lana mineral en las variables de transmitancia térmica U, pérdidas de calor por la envolvente, demanda eléctrica y potencia.....	69
<b>Tabla 9:</b> Resultados comparativos entre la situación proyectada del módulo 1 y cada una de las 3 soluciones propuestas. Se muestran las variables que se ven más afectadas a las oportunidades de mejora presentadas.....	72
<b>Tabla 10:</b> Demanda de energía eléctrica del Colegio Plazuela considerando los requerimientos generales del establecimiento (enchufes, luminaria etc.) y los requerimientos de calefacción del módulo 1. ....	76
<b>Tabla 11:</b> Requerimientos eléctricos y la distribución de la energía generada entre las distintas demandas. Todos los valores están en unidad de kilo-watt hora anual [kWh/año]..	77
<b>Tabla 12:</b> Detalle de costos de cada una de las soluciones, tanto por unidad de área como totales, con sus respectivas variaciones.....	82
<b>Tabla 13:</b> Resultados económicos de las dos alternativas de paneles fotovoltaicos estudiados. ....	86
<b>Tabla 14:</b> Datos totales agregados para el Escenario Propuesto, considerando el colegio completo.....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1:** Plano del Módulo 1 del Colegio Plazuela de Lo Miranda..... 34
- Figura 2:** Corte transversal al Módulo 1. Se remarcan los componentes de la envolvente con color rojo, además de presentar otros detalles como altura de ventanas y material aislante de cubierta (en amarillo), existencia de pasillo exterior, entre otra información. ....35
- Figura 3:** Comparación entre distintos sistemas de calefacción y sus respectivos generadores de material particulado. Fuente: Curso on-line de calefacción sustentable, Academia Adriana Hoffman, Ministerio de Medioambiente. ....46
- Figura 4:** Ficha constructiva PDA Curicó Sistema EIFS sobre muro de albañilería. Imagen muestra las capas y materiales que constituyen la solución constructiva de aislación. ....61
- Figura 5:** Corte transversal en dirección Norte-Sur del módulo 1. En amarillo se destaca la lana mineral a instalar según el proyecto de conservación. En morado se destaca el muro de terciado que compone la envolvente del recinto..... 68
- Figura 6:** A la derecha, se muestran las capas del piso del Escenario Proyectado, mientras que a la izquierda, se presenta la propuesta de aislación para todas las salas del módulo 1. Fuente: Elaboración propia..... 73

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Se presenta el comportamiento promedio por hora tanto de la ganancia solar como también de la radiación solar a lo largo del año.....	41
<b>Gráfico 2:</b> Potencia requerida en los meses de invierno a lo largo de la jornada escolar para mantener la temperatura del aula a 20°C .....	46
<b>Gráfico 3:</b> Comportamiento de la temperatura interna de la sala durante los meses de invierno, producto del funcionamiento del sistema de calefacción considerado en el proyecto de conservación .....	47
<b>Gráfico 4:</b> se muestra el comportamiento de las variables Q y Gs antes distintos valores de la transmitancia térmica de la cubierta. Pese a no tener exactamente la misma unidad de medida, ambas presentan una pendiente positiva. ....	53
<b>Gráfico 5:</b> Comportamiento de las ganancias y pérdidas de calor de las salas en los meses de invierno en el Escenario Actual .....	54
<b>Gráfico 6:</b> Comportamiento de las ganancias y pérdidas de calor de las salas en los meses de invierno en el Escenario Proyectado .....	54
<b>Gráfico 7:</b> Curva de potencia requerida para mantener la temperatura al interior de la sala de clases a 20°C durante los meses de invierno (junio, julio y agosto) .....	55
<b>Gráfico 8:</b> Ahorro de consumo eléctrico que se alcanza con cada una de las soluciones. Esto, manteniendo el requerimiento de temperatura y considerando los equipos detallados en el análisis 5.1. ....	62
<b>Gráfico 9:</b> Energía eléctrica ahorrada por cada metro cuadrado de sistema de aislación térmica EIFS instalado en cada una de las soluciones propuestas, manteniendo los supuestos y requisitos de temperatura del análisis 5.1 .....	63
<b>Gráfico 10:</b> Ahorro eléctrico que implica la instalación de ventanas de termopanel en cada una de las 3 elevaciones que contemplan superficies vidriadas de forma individual (norte, Sur y Oriente) además de la alternativa conjunta de todas las anteriores.....	66
<b>Gráfico 11:</b> Energía eléctrica ahorrada por cada metro cuadrado de ventana con termopanel (DVH) instalado en cada una de las soluciones propuestas, manteniendo los supuestos y requisitos de temperatura del análisis 5.1. ....	66
<b>Gráfico 12:</b> Comportamiento de la transmitancia térmica del piso y de la demanda eléctrica en función de los distintos espesores de la capa de aislante que se propone instalar en el piso. ....	70
<b>Gráfico 13:</b> Muestra los ahorros absolutos y relativos, en porcentaje, según los distintos espesores del material aislante propuesto para el piso del módulo 1.....	71
<b>Gráfico 14:</b> Aportes tanto de la energía eléctrica generada por los paneles solares de 1,5 kW de potencia como también de la red de distribución para satisfacer la demanda de calefacción del módulo 1.....	79
<b>Gráfico 15:</b> Aportes tanto de la energía eléctrica generada por los paneles solares de 3 kW de potencia como también de la red de distribución para satisfacer la demanda de calefacción del módulo 1.....	80

<b>Gráfico 16:</b> Grafico de indicador “Costo-Eficiencia” para cada una de las soluciones estudiadas. La unidad de medida es [\$/kWh/año]. .....	83
<b>Gráfico 17:</b> presenta los valores del índice de costo-eficiencia en perspectiva con los costos totales de obras respectivos de cada solución. ....	84
<b>Gráfico 18:</b> Distribución de las soluciones en base a los parámetros de ahorro anual e índice Coste-Eficiencia.....	85
<b>Gráfico 19:</b> Gastos por conceptos de suministro eléctrico aportados por la empresa distribuidora CGE, para cada uno de los escenarios estudiados. ....	89
<b>Gráfico 20:</b> Desglose de la inversión por cada obra propuesta .....	89

## 1. | PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Hace muchos años que la ausencia de confort térmico en los establecimientos educacionales, principalmente en las temporadas de otoño e invierno, es un problema que aparece en todos los medios de comunicación. Especialmente en las zonas centro, sur y austral de Chile, existen escenarios precarios que dificultan las actividades escolares de los estudiantes. Las manifestaciones de los profesores, apoderados y los mismos jóvenes, sumados a paros indefinidos y protestas, han marcado la agenda de una problemática que se repite año a año y que está lejos de solucionarse de raíz.

Un claro y reciente ejemplo de esto es la condición en la que se encuentra la Escuela Arturo Alessandri Palma de Frutillar, con graves problemas de calefacción, salubridad e infraestructura (Díaz, 2019). El colegio Galvarino, de la comuna de San Pedro de la Paz, es otro establecimiento donde tanto alumnos como docentes sufren problemas similares, desarrollando actividades académicas cuando la temperatura apenas sobrepasa los cero grados (Cabrera y Risso, 2018).

Escasas han sido las medidas que se han tomado para buscar resolver estas situaciones. Si bien existen recursos desde el Ministerio de Educación para mejorar la infraestructura de los colegios, estos fondos se entregan de forma puntual a ciertos establecimientos, dejando a muchos aun sin solución (Ministerio de Educación, 2019). Otras soluciones “provisorias” por parte del gobierno, como habilitar el uso de recursos de la Subvención Escolar Preferencial (SEP) para reparar o instalar sistemas de calefacción (Superintendencia de Educación, 2018), están lejos de brindar a la comunidad educativa el espacio y ambiente necesario para poder llevar a cabo las clases.

La ley chilena, según el Decreto N°548, obliga al sostenedor del establecimiento a garantizar una temperatura mínima de 12°C para las aulas de educación media y básica y de al menos 15°C para las salas de educación de párvulos, para los establecimientos ubicados en la zona centro, sur y andina (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2011). Por distintas razones, son muchos los establecimientos que no están pudiendo lograr dichas temperaturas mínimas, generándose una larga lista de efectos secundarios.

El Ministerio de Energía no es ajeno a este tema ya que lo identifica claramente en su documento Ruta Energética 2018-2022, estableciendo el Programa de Mejoramiento Energético de la Infraestructura Escolar Pública, donde se comprometen a mejorar la infraestructura de 200 establecimientos (Ministerio de Energía, 2018), lo que si bien avanza en la dirección correcta, aún no es suficiente para resolver la situación.

¿Por qué es tan grave no tener la temperatura adecuada en la sala? Además de perjudicar de manera directa el proceso de aprendizaje, los efectos dañinos en la salud de los estudiantes, como enfermedades respiratorias, infecciosas, bronquitis, etc. (Ibarra y Mora, 2011) provocan un porcentaje importante de ausentismo e incluso deserción escolar, entre otras consecuencias, además de ser indudablemente una preocupación adicional que afecta la calidad de vida de toda la comunidad educativa.

Ahora bien, ¿cuál es el sistema de calefacción óptimo para alcanzar un confort térmico? ¿de qué otras variables depende el alcanzar un ambiente térmicamente adecuado? ¿Cómo afectan las posibles emisiones de gases de estos sistemas a la salud de los propios estudiantes y profesores? ¿Cómo garantizar que estos sistemas sean realmente eficientes y que solucionen el problema de raíz? ¿Cuál es el costo económico estas soluciones?

Si en Chile se está discutiendo tanto sobre tener educación de calidad, lo primero que se debería poder garantizar es una sala con confort térmico para desarrollar los procesos de aprendizaje de sus estudiantes.

## 2. | OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Analizar las obras contempladas en el proyecto de conservación del Colegio Plazuela, para determinar si son suficientes para garantizar un confort térmico al interior de sus salas de clases, a través de un análisis de eficiencia energética. Independiente del resultado anterior, se buscan proponer soluciones adicionales al proyecto que permitan aumentar la eficiencia energética del recinto.

### 2.2 Objetivos específicos

Calcular la demanda energética necesaria para que el sistema de calefacción del establecimiento pueda garantizar una temperatura propicia para alcanzar un confort térmico al interior del aula de clases.

Identificar y estudiar todas las variables relacionadas con el confort térmico y calcular sus valores para la infraestructura del Colegio Plazuela.

Estudiar y evaluar posibilidad de incorporar energías renovables no convencionales (ERNCC) como parte de la solución a mejores sistemas de calefacción y abastecimiento energético.

Identificar problemas de infraestructura de los establecimientos educacionales, analizando materiales y tipos de construcción, a fin de poder proponer soluciones para mejorar sistemas de ventilación y aislación de las salas.

Identificar y estudiar problemas de salud que sufren los estudiantes como consecuencia de no contar con confort térmico en sus respectivas salas de clases.

### 3. | MARCO TEÓRICO

Para llevar a cabo un correcto proceso de busca de solución a problemas, cualquiera sea su índole, es necesario conocer características del entorno en el cual se inserta el problema y desde el cual se buscarán alternativas de resolución, como ocurre por ejemplo en el marco de la gestión estratégica y la evaluación de proyectos a través del análisis PESTA. De forma similar, el problema de la falta de confort térmico en establecimientos educacionales requiere un estudio minucioso de todos los antecedentes y actores que juegan un rol clave en la obtención de buenos resultados.

De forma particular, al tema presentado en esta memoria convergen distintas materias que han sido organizadas en cinco capítulos fundamentales, los cuales se detallan a continuación:

#### 3.1. Antecedentes del problema

Tal como se menciona en la introducción de la presente memoria, el problema de la falta de calefacción en los establecimientos educacionales especialmente en las estaciones de otoño e invierno generan condiciones muy precarias para el aprendizaje. El ejemplo de la Escuela Arturo Alessandri Palma de Frutillar, con graves problemas de calefacción, salubridad e infraestructura (Díaz, 2019) ha sido una de las principales razones de la elección de este tema, debido a la gravedad de las condiciones y los negativos efectos que esto genera en los estudiantes. Lamentablemente, la información que surge durante la búsqueda no hace más que confirmar un escenario muy preocupante. Desde hace poco menos de una década, el estudio realizado por Molina y Veas, (2012), donde evalúan las condiciones al interior de las salas de clases de escuelas de las regiones XI y IX de Chile, ya mostraban la presencia de

una problemática debido a que ninguno de los establecimientos educacionales analizados cumplía con los requisitos mínimos de temperatura al interior del aula.

Informaciones más recientes no son más alentadoras. La Superintendencia de Educación recibe constantes denuncias debido a establecimientos educacionales cuya infraestructura no cumple con la normativa vigente, alcanzando las 867 denuncias a nivel nacional en el año 2019. De ellas, el 70% se concentran entre el segundo y tercer trimestre, precisamente las épocas más frías del año. (Superintendencia de Educación, 2019).

Escasas han sido las medidas que se han tomado para buscar resolver estas situaciones. Si bien existen recursos desde el Ministerio de Educación para mejorar la infraestructura de los colegios, estos fondos se entregan de forma puntual a ciertos establecimientos, dejando a muchos aun sin solución (Ministerio de Educación, 2019). Otras soluciones “provisorias” por parte del gobierno, como habilitar el uso de recursos de la Subvención Escolar Preferencial (SEP) para reparar o instalar sistemas de calefacción (Superintendencia de Educación, 2018), están lejos de brindar a la comunidad educativa el espacio y ambiente necesario para poder llevar a cabo las clases.

La ley chilena, según el Decreto N°548, obligar al sostenedor del establecimiento a garantizar una temperatura mínima de 12°C para las aulas de educación media y básica y de al menos 15°C para las salas de educación de párvulos, para los establecimientos ubicados en la zona centro, sur y andina (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2011). Por distintas razones, son muchos los establecimientos que no están pudiendo lograr dichas temperaturas mínimas, generando una larga lista de efectos secundarios.

Por otro lado, es importante destacar algunos ejemplos que donde se está alcanzando un confort térmico en base a sistemas sustentables de calefacción. Uno de ellos es el que se desarrolla desde hace algunos meses en la comuna de Coyhaique. El Centro de Excelencia

en Geotermia de los Andes de la Universidad de Chile (CEGA), motivado por los altos índices de contaminación atmosférica de la ciudad debido a la calefacción en base a leña, localidad que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la ciudad más contaminada de América (Fariña, 2019), está desarrollando un sistema alternativo en base a energía geotérmica. El proyecto considera un plan piloto que ya fue implementado en el Liceo Bicentenario Altos de Mackay y que tiene como objetivo brindar un sistema de climatización eficiente, que permita a más de 300 estudiantes y sus profesores poder regular la temperatura al interior de las salas y evitar cambios bruscos de temperatura y los altos niveles de polución que se generan al interior de las salas. (Fariña, 2019)

El caso de Coyhaique es particularmente notable, ya que hace converger las necesidades propias de los establecimientos educacionales y sus requerimientos de calefacción con energías más limpias que ayuden a mejorar la calidad de vida y de salud de sus habitantes. Por lo mismo, se hace necesario conocer el contexto energético que se vive en el país, cuáles son las fuentes generadoras, qué tecnología se tiene disponible, para poder determinar cuáles son las reales opciones que se pueden considerar para encontrar las soluciones que se persiguen.

Es relevante comprender y considerar la relación que existe entre el contexto energético y los antecedentes políticos y las metas de largo plazo definidas recientemente en Chile. Desde dicho sector, las energías renovables tienen un rol clave, presentándose como la alternativa del futuro gracias a los beneficios ambientales que éstas representan, principalmente para mitigar los altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero generados actualmente.

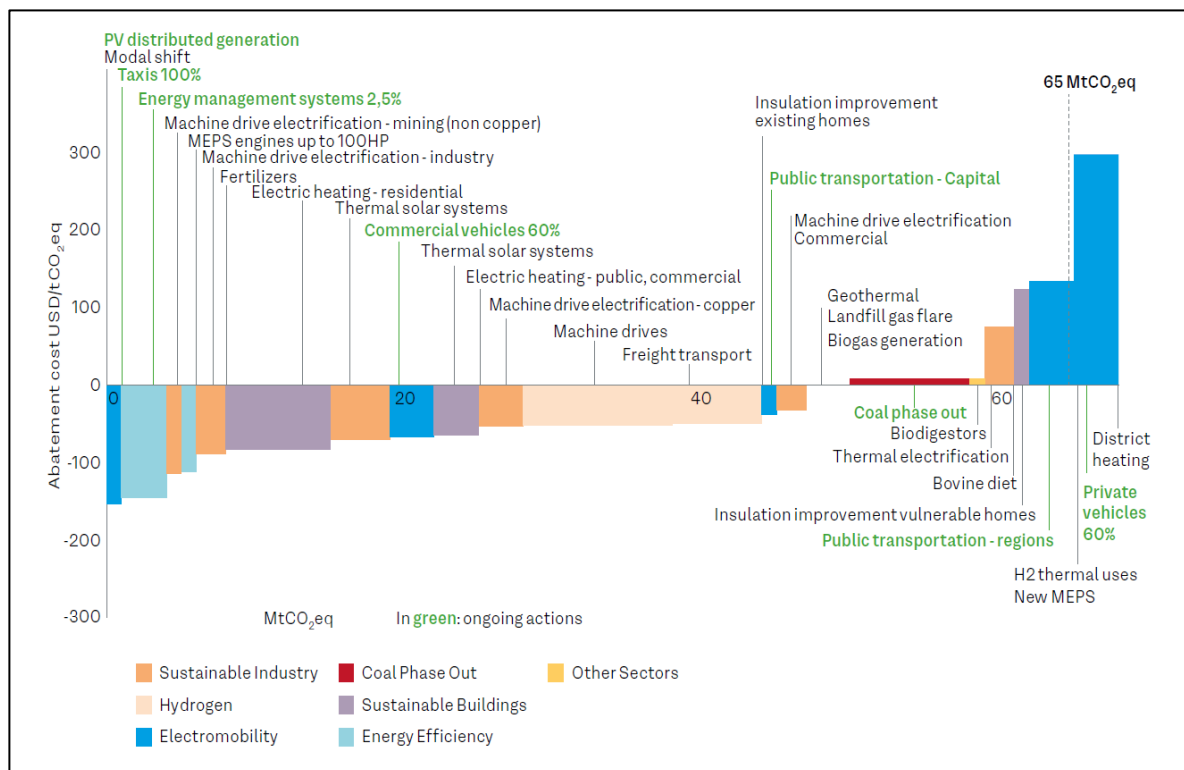
En esta línea, es preciso considerar el presente trabajo de memoria dentro de un contexto nacional marcado por la actualización de la Contribución Determinada a Nivel

Nacional (NDC) publicada por el gobierno de Chile en abril del año 2020. Este documento considera un ajuste de las metas establecidas por el país en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático del año 2015 celebrada en París. A modo general, en dicha instancia la nación adoptó el compromiso de reducir a 123  $MtCO_{2eq}$  sus emisiones anuales para el año 2030, la cual fue actualizada con una meta más ambiciosa que propone emitir no más de 95  $MtCO_{2eq}$  anuales para el año 2030 (Gobierno de Chile, 2020). Más allá de la meta general, se menciona el documento de la NDC en virtud de los compromisos específicos que se adjuntan, muchos de los cuales tienen directa relación con el tema planteado en la presente memoria.

En primer lugar, es necesario reconocer el compromiso del país con lograr “una reducción de al menos un 25% de las emisiones totales de carbono negro al 2030, con respecto al 2016. Este compromiso se implementará principalmente a través de las políticas nacionales asociadas a calidad del aire” (Gobierno de Chile, 2020). Esto debido a que se reconoce la reducción del carbono negro como un aspecto clave para disminuir o limitar el aumento de temperatura global, lo que además “genera una serie de co-beneficios importantes en materia de mejoras de la calidad del aire, disminuyendo los impactos en la salud de las personas (enfermedades respiratorias) y en los costos asociados a estos impactos en la salud” (Gobierno de Chile, 2020).

En este contexto, se reconoce además que una de las principales fuentes de carbono negro es el uso de leña tanto para calefacción como para cocina. Más aun considerando que a nivel nacional el 74% de la población, entre la región de O’Higgins y la región de Aysén, utiliza la leña como su principal combustible para calefacciones y cocina en sus hogares (Gobierno de Chile, 2015).

Además, se debe considerar la información proporcionada en el informe “Chilean NDC mitigation proposal: Methodological approach and supporting ambition”, un documento que entrega información sobre la metodología realizada por el gobierno para determinar el alcance y los objetivos presentados. Este nuevo documento de apoyo científico detalla los costos de abatimiento de distintas iniciativas que contribuyen a la disminución de emisiones. El costo de abatimiento se puede entender como el costo en el que se deben incurrir a fin de reducir una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, según cada una de las iniciativas.



**Gráfico 1:** Costo de abatimiento e impactos de cada una de las iniciativas propuestas por el Gobierno de Chile para alcanzar la meta de mitigar 65MtCO<sub>2</sub>eq para el año 2050.

Tal como se puede ver en el gráfico anterior, dentro de las soluciones que se presentan para alcanzar los objetivos propuestos por el Gobierno de Chile, se encuentran la calefacción eléctrica tanto de carácter residencial como también para los espacios y comercios públicos. Ambas soluciones pertenecen a la categoría “Edificaciones sustentables” representadas por

color lila. Además, ambas representan un costo de abatimiento negativo (entre -80 y -70 USD/tCO<sub>2</sub>eq) lo que quiere decir que invertir en el desarrollo de estas soluciones de mitigación es rentable económicamente. Por otra parte, se puede ver el impacto que estas soluciones generarían al considerar el eje *x* del gráfico, el cual detalla la cantidad de MtCO<sub>2</sub>eq que cada una de estas iniciativas mitiga. En particular, considerando ambos ítems de calefacción eléctrica, éstos generarían una mitigación cercana a los 12 MtCO<sub>2</sub>, representando un 18% del total de la meta fijada para el año 2050.

De esta manera, el proyecto de buscar mejorar la temperatura al interior de los establecimientos educacionales a través alternativas de calefacción sustentables (especialmente la calefacción eléctrica) y bajas en emisiones se alinea con los compromisos adoptados por el gobierno. Además, de forma indirecta, el cambio de sistemas de calefacción al interior de los colegios es un ejemplo práctico para enseñar y sensibilizar sobre el cambio climático, un aspecto clave que la NDC considera dentro de su “Estrategia de Desarrollo de Capacidades y Empoderamiento Climático”.

### **3.2. Energía en Chile**

A nivel nacional, Chile cuenta con una gran cantidad de generadoras de energía, las cuales en conjunto representan una capacidad instalada de 24.292 [MW]. Dicha energía se distribuye a través de 3 sistemas: Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que distribuye el 99,3% de la energía generada y los Sistemas Eléctricos de Aysén (SEA) y Magallanes (SEM) los cuales distribuyen un 0,2% y 0,4% de la energía generada, respectivamente (CNE, 2020). Considerando el origen de la energía inyectada al SEN, las generadoras a carbón, gas natural y de embalse son las que más aportan al sistema, con un 20%, 18% y 14% respectivamente. Éstas tres unidades de generación son consideradas como tradicionales o convencionales.

Sin embargo, en los últimos años las generadoras que utilizan energías renovables no convencionales (ERNC) han tomado un papel cada vez más relevante a nivel nacional. Especialmente algunas como la energía solar o eólica, las cuales representan actualmente un 11% y 8% de la generación total del SEN, respectivamente. Otras fuentes de ERNC presentes en el país son la hidráulica de pasada de pequeña escala y la geotérmica (CNE, 2020).

Más allá de los números, es importante recalcar la presencia de sistemas de generación no convencionales, que apuestan por energías limpias y libres de emisiones que afecten el medioambiente. Su desarrollo en el país ha ido en aumento, durante los últimos años especialmente, representando una hoja de ruta que adopta cada vez más importancia de cara a los desafíos futuros relacionados con la energía y los efectos perjudiciales que hasta el día de hoy provocan las unidades generadoras en base a carbón y petróleo principalmente.

Las ERNC han tenido mayor presencia en el país, en base a los recursos naturales con los que cuenta el país.

En primer lugar, se tiene la energía solar, cuya generación ha aumentado más de 750 veces entre los años 2013 y 2018 (Comisión Nacional de Energía, 2019). Este sistema ha sido desarrollado principalmente en la zona del desierto de Atacama, ya que sus condiciones de escasa nubosidad y alta radiación solar hacen de aquella región una localización ideal para proyectos de estas características. Es posible distinguir entre dos tipos diferentes de energía solar.

Por una parte, está la generación en base a paneles fotovoltaicos, los cuales están fabricados de silicio mono-cristalino y poli-cristalino. Éstos generan electricidad dependiendo de la nubosidad y del grado de inclinación con respecto al sol, principalmente. Dado esto último, es posible encontrar modelos de paneles móviles tanto en una como en dos

dimensiones, que “persiguen” el movimiento diario del sol a fin de ser más eficientes en la obtención de electricidad. (CNE, 2019)

Por otro lado, se reconoce la energía solar de concentración o termo solar, la cual consiste en un conjunto de espejos orientados hacia un punto en común, foco en el cual se posiciona un recipiente con un fluido que es evaporado producto de la radiación dirigida por los espejos (o heliostatos), vapor con el cual se hace funcionar una turbina convencional, logrando generar electricidad.

Uno de los factores importantes a considerar tanto en este tipo de tecnologías como también en las distintas ERNC existentes, son los costos unitarios de inversión de cada tipo de generación. Según la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2019) el costo de inversión unitario de la generación fotovoltaica y termo solar ascienden a 970 US\$/kW y 6.055 US\$/kW, respectivamente.

Además, otro aspecto característico de cada una de las ERNC es su factor de planta. Dicho factor es un indicador de eficiencia, el cual se calcula realizando el cociente entre la energía generada sobre la máxima capacidad de producción. Esto puede traducirse de forma sencilla en la cantidad de horas al día que la tecnología respectiva genera electricidad. Para efectos de la energía solar en general, considerando las dos formas antes descritas, el factor oscila entre el 20-30% (Irrarrázaval, 2019). Valores que tienen directa relación con la cantidad de horas que el sol está en un ángulo lo suficientemente perpendicular al plano del panel/espejo. Esto último representa una de las grandes diferencias que tienen las ERNC con los métodos tradicionales de generación, ya que éstos poseen valores de factor de planta que son considerablemente más altos en la mayoría de los casos. Así, podemos encontrar factores para las energías convencionales en base a carbón o hidráulicas de embalse de 85% y 50% aproximadamente (Irrarrázaval, 2019).

Otra de las ERNC que han sido potenciadas durante los últimos años es la energía eólica. Representa el 8% del total de la capacidad instalada en el país, cuyos proyectos se han ubicado principalmente en las regiones de Antofagasta y Magallanes, dadas las corrientes de viento existentes en dichos puntos. También se pueden diferenciar dos tipos de energías eólicas: on-shore (en tierra firme) y off-shore (en el mar). En Chile solo se ha desarrollado la primera de ellas. Los generadores eólicos operan típicamente “entre los 3 y 25 m/s de velocidad de viento” (CNE, 2019), variando su generación entre 1 MW a 8 MW. La principal limitante de este tipo de tecnología es la disponibilidad de terrenos que se debe tener ya que para contar con una planta que alcance los cientos de MW, el área de ocupación debe ser considerablemente extensa. Por parte de los costos unitarios de inversión, estos ascienden a 1.361 US\$/kW (CNE, 2019). Además, como se podría esperar la variabilidad de los vientos afecta fuertemente el factor de planta de las unidades eólicas de generación, con un valor aproximado de 30% (Irrázaval, 2019).

Existen otros tipos de ERNC, como lo son la mini Hidráulica de Pasada, Biomasa, Biogás, y Geotérmica (la cual es utilizada en el proyecto de CEGA presentado en el apartado de Antecedentes) que también aportan, aunque en menor medida, al total de la capacidad instalada. Todas ellas poseen también sus datos de factores de planta, costos unitarios de inversión y detalles en cuanto a funcionamiento, información que se detallará en caso de ser necesaria más adelante. De momento, se considerará suficiente la presentación de conceptos clave, además de la presentación de las dos ERNC predominantes en Chile.

Y más allá de ver este tipo de energías como una forma de abastecer el sistema de transmisión del país (del cual se hablará más adelante) es importante ver que estas energías pueden representar generadoras independientes, que si bien pueden representar una inversión inicial bastante considerable, pueden ser consideradas como soluciones de largo plazo

válidas, a la hora de buscar alternativas eficientes y limpias para abastecer de energía los sistemas de calefacción de los establecimientos educacionales, tal como el ya mencionado caso de Liceo Bicentenario en la comuna de Coyhaique.

El Estado de Chile ha propuesto un plan denominado Política Energética 2050 en el cual fijan objetivos muy relacionados con el desarrollo de las ERNC. Tanto así, que proponen metas que pretenden que el 60% de la capacidad instalada al año 2035 y el 70% a año 2050 sea de energías renovables no convencionales. (Ministerio de Energía, s.f.)

Ahora bien, esto representa un desafío mayor en cuanto a las posibilidades el almacenamiento de la energía. Ya se veía en los párrafos anteriores, que las ERNC cuentan con una desventaja en cuanto a los factores de planta, los cuales son considerablemente menores a los mecanismos tradicionales de generación. En respuesta a lo anterior, uno de los mecanismos que se han empezado a desarrollar son los denominados Pumping o bombeos.

En palabras simples, un sistema de almacenamiento Pumping consiste en utilizar parte de la energía que se genera, por ejemplo, durante un día en un parque fotovoltaico, para bombear agua a una cierta altura, la cual es dejada caer transformándola de energía potencial a energía cinética, generando electricidad durante las horas de oscuridad a través de sistemas hidráulicos de paso o de embalse. Un claro ejemplo de lo anterior es el proyecto Valhalla (Cossio y Fajardo, 2017).

El mismo documento de Política Energética 2050 hace referencia a lo anterior “Contar con un mayor nivel de hidroelectricidad con capacidad de regulación es muy importante para habilitar una mayor penetración de fuentes variables, agregando flexibilidad al sistema”. (Ministerio de Energía, s.f.)

Es importante tener presente dos escenarios que se pueden dar en caso que un particular, ya sea en un domicilio, establecimiento educacional, negocio, etc. instale una fuente generadora de ERNC. Estos son los denominados sistemas on-grid y off-grid.

El sistema on-grid contempla una conexión con la red distribuidora, de esta manera, cualquier excedente de energía podría ser comercializado e inyectado a la red. Este fenómeno se conoce como Netbilling y está regulado por la Ley 20.571 la cual “entrega el derecho a los usuarios a vender sus excedentes directamente a la distribuidora eléctrica a un precio regulado, el cual está publicado en el sitio web de cada empresa distribuidora.” (Superintendencia de Electricidad y Combustibles, s.f.)

Por el contrario, los sistemas off-grid no presentan una conexión a la red distribuidora, por lo que no cuentan con la posibilidad de comercializar los excedentes.

Los sistemas mencionados anteriormente representan una gran oportunidad para los establecimientos educacionales que no cuentan con un confort térmico para sus estudiantes, debido a que les proporcionaría la energía necesaria para abastecer potenciales sistemas de calefacción mediante una generación limpia y sustentable, logrando generar un ambiente confortable para los estudiantes.

Para poder realizar un análisis en profundidad, además del contexto energético el país se hace necesario conocer detalles sobre el funcionamiento del Sistema Educacional en Chile, cuáles son las realidades de los distintos establecimientos educacionales que existen a lo largo del país, cuáles son sus cuerpos de gobernanza, cómo se clasifican entre sí, entre otros temas relevantes para el desarrollo de la presente memoria.

### 3.3. Sistema Educativo en Chile

Los establecimientos educacionales en Chile se pueden dividir en 5 grupos, en función de las formas en que éstos se financian y administran (Mineduc, s.f.). De ellos, hay 3 que son los principales.

Por una parte, están los denominados particulares pagados, donde el 100% de los ingresos del establecimiento son adquiridos mediante el pago de matrículas y mensualidades por parte de los apoderados.

Luego, están los establecimientos particulares subvencionados, donde si bien los apoderados también cancelan cuotas de matrícula y mensualidades, las cuales son relativamente menores a las del primer grupo, el establecimiento también recibe una “subvención” o cuota de parte del Estado por cada estudiante matriculado. Existen distintos tipos de subvención, los cuales dependen de las características del modelo educativo del establecimiento. Algunos de estos aportes funcionan a modo de incentivo, como por ejemplo la Subvención Educativa Pro-Retención, donde el Estado paga un monto anual entre 90 mil a 125 mil pesos a los sostenedores por cada alumno que ellos puedan acrediten haber matriculado y retenido, ente otras características (Mineduc, s.f.).

Finalmente están los establecimientos municipales, los cuales son financiados íntegramente por el Estado mediante la Municipalidad respectiva a la ubicación del recinto, la que actúa como sostenedora del establecimiento.

Los dos grupos restantes, cuyas categorías reciben el nombre de “Corporación de administración delegada” y “Servicio local de educación” también presentan un tipo de financiamiento desde el sector público. Este último es un nuevo sistema de administración de la educación pública, creado según la Ley 21.040 publicada en noviembre del año 2017, el cual busca que todas las escuelas y liceos públicos migren progresivamente hacia este

nuevo sistema, dejando atrás las administraciones mediante las Municipalidades o Corporaciones municipales (BCN, 2019)

En Chile, según el último Anuario del Ministerio de Educación (Centro de estudios Mineduc, 2019) el 5,86% de los establecimientos educacionales son privados, el 48,94% son particulares subvencionados, el 42,55% corresponde a municipales. Los porcentajes restantes corresponden a Establecimientos de Administración delegada (0,6%) y a Servicios locales de educación (2,04%). Estos valores consideran solamente recintos de Educación básica y media, excluyendo así los establecimientos de educación parvulario y superior.

La realidad de Chile muestra que los colegios privados cuentan con más recursos que los establecimientos subvencionados y municipales, lo que se traduce en mejor infraestructura, mejor material de apoyo, entre muchas otras variables. En definitiva, un buen ambiente para que los profesores realicen sus clases. Todo esto entrega como resultado un sistema educativo de mejor calidad para este grupo de establecimientos.

Una muestra de ello son los resultados de las pruebas estandarizadas que se realizan a lo largo del territorio nacional. Tomando como ejemplo los resultados de la Prueba de Selección Universitaria (PSU) del año 2020, solo 2 establecimientos municipales aparecen entre los 50 recintos con mayor puntaje, todo el resto corresponden a colegios particulares pagados (CNN, 2020).

Evidentemente el sistema educacional de Chile refleja la desigualdad que se vive en general en el país, donde las oportunidades están del lado de quien tiene la posibilidad de poder pagar por ellas. Y para aportar a equilibrar en parte esta balanza, es primordial que los estudiantes, sea cual sea su nivel socioeconómico, puedan contar con una infraestructura que les asegure un confort térmico que proporcione un ambiente con condiciones mínimas para poder desarrollar correctamente el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Se hace necesario entonces conocer definiciones generales sobre el confort térmico, como se puede alcanzar y cuáles son las variables más importantes a considerar para garantizar un ambiente óptimo.

### **3.4. Confort térmico**

La definición de confort térmico que entrega la norma ASHRAE 55, elaborada por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, señala que el confort térmico (o confort higrotérmico) es “el estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico” (Molina & Veas, 2012). Por su parte, María Blender, arquitecta con un Máster en la Universidad de Stuttgart, va un poco más allá al afirmar que el confort térmico es “la satisfacción de los usuarios de los edificios con el ambiente térmico” además de agregar que “es subjetiva y depende de diversos factores” (Blender, 2015). Uno de esos factores es la temperatura, la cual es incluida en la definición entregada por Waldo Bustamante, Magíster en Desarrollo urbano de la Pontificia Universidad Católica de Chile y profesor de la Escuela de Arquitectura de la misma casa de estudios, quien señala que el confort higrotérmico es “aquel estado en que las personas expresan satisfacción con el ambiente que lo rodea, sin preferir condiciones de mayor o menor temperatura” (Bustamante, Rozas, Cepeda, Encinas, & Martínez, 2009).

De las definiciones anteriores se desprende que el confort térmico no está ligado a datos específicos y que más bien es un concepto general que depende en gran medida del usuario y sus propias sensaciones de confort. Lo cual tiene sentido, considerando, a modo de ejemplo, el caso en que una persona que vive en una región particularmente fría, puede sentirse a gusto con una temperatura de 15°C, a diferencia de otra persona que habite en un sector con altas temperaturas, la cual probablemente no este satisfecha y asocie esos 15°C a un clima frío.

Sin perjuicio de lo anterior, cada uno de los factores relevantes para alcanzar un confort térmico al interior de un recinto -en este caso, para una sala de clases- poseen un rango de valores que generan consenso entre los autores y pueden ser considerados como ideales.

Si bien en un primer momento se asocia el confort térmico con algún sistema de calefacción que proporcione la temperatura necesaria para lograr un espacio confortable, son igual de importantes otras variables que serán incorporadas en este ejercicio.

En primera instancia, se tienen parámetros transversales. Por una parte, está la temperatura interior del recinto, la cual en un contexto de confort térmico en la temporada de invierno, debería oscilar alrededor de los 20°C (Blender, 2015). Éste parámetro es uno de los indicadores más importantes considerar en este estudio. Por otra parte, otra variable fundamental es la humedad relativa del aire interior. Se tiene que un rango favorable para la salud humana debe oscilar entre el 30% y el 70% (Blender, 2015). El resto de los parámetros y variables, se han clasificado en los tres en los siguientes grupos: Ganancia de calor, Aislación térmica y Ventilación.

#### **3.4.1. Ganancia de calor**

Uno de los principales parámetros que se deben gestionar para generar el calor adecuado en una sala de clases es contar con un sistema de calefacción. Para efectos de esta memoria, se estudiarán algunas de las opciones existentes utilizadas con mayor frecuencia. A saber, se analizará la generación de calor a través de la combustión de biomasa (leña y/o pellet), por energía eléctrica (con calefactores), con sistema de calefacción central (mediante radiadores con flujo de agua caliente) y estufas a gas o parafina.

Cada uno de los mecanismos anteriores cuenta con ventajas y desventajas desde el punto de vista de los niveles de emisiones que cada uno de ellos genera. Estas características se estudian a continuación.

La calefacción en base a leña ha sido desde hace varias décadas el combustible preferido por la población chilena para lograr combatir las bajas temperaturas, debido principalmente a que su gran potencia térmica y su costo, que es más bajo comparado con el resto de los combustibles, ya que por “unidad de energía es 4 veces más barata que el gas y 6 veces más barata que la electricidad” (Schueftan y González, 2014).

Sin embargo, estos sistemas presentan un grave problema debido a una razón principal: la humedad del recurso. Para alcanzar una buena combustión, la humedad del material debe ser menor o igual al 20% (Díaz y Carrasco, 2018). Sin embargo, la realidad indica que estas condiciones la mayoría de las veces no se cumple. De esta manera, con escenarios de combustión incompleta parte de la energía se invierte en eliminar el exceso de agua en vez de generar calor, permitiendo además la proliferación de otros gases como monóxido de carbono, benceno, butadieno, formaldehído, hidrocarburos poliaromáticos y otros compuestos perjudiciales para la salud. (Durán, 2019). Por su parte, el humo de la combustión genera otros elementos dañinos, como lo son el material particulado (MP). Estos se clasifican según su tamaño. Se denomina MP10 al material particulado de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$  y MP 2,5 cuando es menor a 2,5  $\mu\text{m}$ , siendo ese último “el más perjudicial para la salud humana”. (Schueftan y González, 2014). Esto ha generado que la mayoría de las ciudades con Plan de Descontaminación restringen el uso de estos sistemas a leña en días con mala calidad del aire (Academia Adriana Hoffmann, 2020)

Una alternativa al uso de leña es el uso de pellet como combustible, el cual está compuesto de aserrín comprimido en forma de cilindro y con muy baja humedad (CCS). El tamaño de la leña genera una desventaja al no poder estar en su totalidad en contacto con el aire, lo que hace que éste no pueda combinarse de forma efectiva con la madera. En este sentido, elementos de combustión de forma líquida o gaseosa si logran mezclarse de forma

óptima con el aire alcanzando mejores rendimientos y menores emisiones. Justamente este último concepto es el que considera el pellet. Tal como señala Schueftan y González (2014):

En la combustión los pellets se disgregan en partículas que tienen una relación alta de superficie a volumen, aumentando la eficiencia de quemado y disminuyendo los contaminantes y humo. Para el mismo principio de funcionamiento de una estufa, y para el mismo contenido de humedad, la combustión de pellets genera entre 3 y 6 veces menos humo y contaminantes que la leña.

Justamente por la razón anterior es que los otros sistemas de calefacción mencionados anteriormente, en base a calefactores eléctricos, radiadores de agua caliente y estufas a gas o parafina no representan una emisión de gases tan importante como en el caso de la leña. De todos estos, el menos contaminantes es el sistema de calefacción eléctrico, debido a que es la resistencia eléctrica por la cual circula la corriente que logra generar la transmisión de calor al ambiente. Sin embargo, es necesario tener presente dos aspectos con respecto a este último sistema.

Por una parte, es el método de calefacción menos eficiente en cuanto a su costo, ya que se emplean altos niveles de consumo de energía eléctrica (Díaz y Carrasco, 2018). El costo de operación de este tipo de calefactores, utilizándolo 8 horas al día, puede representar un gasto mensual de \$150.000 aproximadamente, mientras que para él un mismo intervalo temporal de uso, la calefacción a leña ronda los \$30.000 mensuales (CCS)

Y, por otro lado, es necesario considerar que si bien la energía eléctrica puede ser considerada como “limpia”, se debe tener especial cuidado para determinar las fuentes generadoras que producen dicha electricidad. Porque, en el caso de que esta sea suministrada por una unidad generadora de en base a carbón o petróleo (sistema convencional), la huella de carbono de la electricidad que se emplea para la calefacción seguirá siendo importante.

El real impacto que el problema que un sistema de calefacción precario provoca en los establecimientos educacionales va más allá de la cifra de la temperatura al interior de la sala de clases. Tanto la calidez del ambiente como las emisiones presentes generan enfermedades en los y las estudiantes, siendo ésta una de las consecuencias más graves de esta problemática, que además impiden el correcto desarrollo del proceso de aprendizaje y, por lo tanto, igualdad de oportunidades para el futuro.

Otro aspecto parámetro muy importante a la hora de considerar las fuentes de calor dentro de una sala de clases es la emanación de calor propia de las personas al interior de la sala. El cuerpo humano “quema” alimento y genera calor residual, similar a cualquier máquina. Para mantener su interior a una temperatura de 37°C, tiene que disipar el calor y lo hace por medio de conducción, convección, radiación y evaporación. De esta manera, en un escenario en el que la temperatura ambiental se acerca a la temperatura corporal, el cuerpo ya no puede transmitir calor por falta de un gradiente o diferencia térmica, siendo la evaporación la única forma de enfriamiento (Blender, 2015). Tomando como ejemplo la contextura de una persona adulta de contextura física normal, en estado de reposo, genera alrededor de 115 W (Chávez, 2002). Esto es un factor clave a considerar teniendo en cuenta que en una sala de clases la cantidad de persona, entre profesores y alumnos, puede ser fácilmente 30. Además, de no considerar este efecto se podría dar un escenario de exceso de temperatura en la sala, ya que se demandaría una potencia calorífica mayor a la necesaria al sistema de calefacción, pudiendo generar un efecto contraproducente y poco eficiente.

Por último, es necesario considerar la ganancia solar que recibe el recinto, ya sea a través de elementos opacos como vidriados. Ésta dependerá directamente de la zona geográfica en la cual se encuentre el establecimiento educacional, como también de su respectivo clima. Para poder capturar el calor mediante la radiación solar, se hace muy

necesario entender los materiales de construcción que favorecen este intercambio, los cuales además poseen características que permiten gestionar la aislación de la sala para evitar fugas de aire cálido al exterior. Los parámetros más relevantes se detallan en el siguiente apartado.

### **3.4.2. Aislación térmica**

Tan importante como los sistemas que se emplean para la generación de calor, son las características de la envolvente (techos, paredes, ventanas y suelo; todo lo que separe la habitación del exterior) que impide que el calor se disipe a través de estos materiales. La aislación térmica juega un papel fundamental en el alcance de una eficiencia energética óptima para poder mantener la temperatura de una sala de clases dentro de un rango ideal.

De esta forma, propiedades como la resistencia térmica o transmitancia térmica de los materiales utilizados, son primordiales para poder entender el papel de los sistemas de aislación junto con evaluar si los efectos generados son óptimos o presentan algunas oportunidades de mejora.

En Chile, la norma que regula la aislación térmica es la NCH 853-Of.2007 “Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas” (Colonelli, Guevara, Blender, & Yañez, 2015), documento en el cual se detallan en profundidad todos los parámetros involucrados a considerar en las etapas de construcción y remodelación de instalaciones y dicta la forma de llevar a cabo los cálculos respectivos. Adicionalmente, cuenta con una guía de valores mínimos que deben cumplir las resistencias térmicas y otras variables de los materiales, según la zona geográfica en la que se encuentren. Esto debido a la evidente diferencia de clima entre las distintas regiones del país.

Dentro de este contexto, es muy importante considerar la variable denominada Temperatura media radiante o también llamada temperatura superficial interior de la

envolvente. Uno de los aspectos más relevantes de este parámetro es que su valor debe estar en constante comparación con la temperatura del aire interior del recinto, ya que en caso que estos dos valores disten mucho entre sí, podrían ocurrir distintos fenómenos que afecten directamente el confort térmico, como por ejemplo la condensación de agua, generación de moho u hongos en las paredes, entre otros efectos. Para evitar estos escenarios, una de las consideraciones más importantes que se debe tener es que la temperatura superficial interna sea siempre superior al punto de rocío (Blender, 2015).

Sin embargo, aun teniendo un sistema de calefacción eficiente y limpio y sistemas adecuados de aislación para retener el calor generado, no es posible aun garantizar un confort térmico sostenible en el tiempo. El aire estancado sumado a generación de dióxido de carbono como resultado del metabolismo humano, hacen necesaria una correcta ventilación del aula, variable que se detalla en el siguiente apartado.

### **3.4.3. Ventilación**

Con el fin de que la calidad del aire al interior de las salas sea la adecuada a lo largo de toda la jornada escolar, es muy importante considerar algunos aspectos con respecto a la ventilación. En primer lugar, según la Ordenanza General de Urbanización y Construcciones del Ministerio de Vivienda y Urbanismo considera esto al precisar que los “establecimientos docentes” deben contar con un 8% de su superficie interna destinada a ventilación, lo cual debe permitir preferentemente, una aireación en la parte superior de los recintos. Esto es válido para todas las zonas geográficas del país (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2020).

El rol de la ventilación es clave para evitar la generación de olores desagradables, riesgo de contaminación del aire por presencia de partículas, gérmenes o dióxido de carbono entre otros gases (Bustamante, Rozas, Cepeda, Encinas, & Martínez, 2009). Es importante precisar que una persona en promedio, con una actividad sedentaria, espira 7 litros de aire

por minuto (Bustamante et al., 2009), lo cual si se multiplica por la cantidad de personas dentro de una sala de clases hace muy necesaria contar con un mecanismo constante la circulación del aire para permitir el ingreso de oxígeno. Indudablemente la ventilación representa una pérdida del calor generado al interior, por lo cual un exceso de aireación también es perjudicial para alcanzar un confort térmico. Por lo mismo, se hace necesario encontrar un punto intermedio que permita mantener una temperatura interior relativamente constante y una buena calidad del aire. Las corrientes de aire, sobretodo en invierno, generan mucha inconformidad debido a que disminuyen la sensación térmica de las personas. En general, los movimientos de aire son agradables cuando no superan una velocidad de 0,1 a 0,2 m/s (Blender, 2015). Esto, en conjunto con el área superficial destinada a ventilación y al volumen de aire total de la sala, además de los parámetros de ganancia de calor y aislación térmica, ya permite tener parámetros suficientes para gestionar y así poder alcanzar el objetivo principal de garantizar un confort térmico para la comunidad educativa.

### **3.5. Consecuencias de la ausencia de confort térmico**

El proceso de aprendizaje de los estudiantes es un fenómeno estudiado ampliamente, ya que es un tema que depende de una gran cantidad de variables. Desde la calidad del equipo docente, hasta la realidad de los estudiantes en sus hogares, este tema puede ser abordado desde distintas aristas. Así lo reconoce la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en su informe denominado Tercer Estudio Regional Comparativo y Explicativo (TERCE), en el cual, en base a un análisis estadístico de la educación en Chile, se afirma que “el nivel socioeconómico promedio de los estudiantes que asisten a un establecimiento escolar es el factor de escuela más fuertemente asociado a los resultados de aprendizaje”. Además, se sostiene que “en la medida que baja el estatus

socioeconómico de las familias de los estudiantes que asisten a una determinada escuela, disminuye a su vez el desempeño de esta en todas las áreas curriculares evaluadas” (UNESCO). Si bien este factor puede ser considerado como el más importante, o al menos uno de los más relevantes, en el aprendizaje de los jóvenes, el Banco de Desarrollo de América Latina afirma que “la evidencia empírica indica que existe una relación directa entre infraestructura escolar y rendimiento educativo” (Banco de Desarrollo de America Latina, 2016). Infraestructura que es primordial si se quiere proporcionar un ambiente confortable tanto térmicamente, como también a nivel acústicos y de iluminación.

A nivel nacional, también existen estudios que ratifican la importancia de estos factores. Uno de ellos es el publicado en la Revista AUS de la Universidad Austral de Chile, en el cual se concluye que “donde la correlación más clara que se observa entre estos casos de estudio se encuentra en el indicador socio-económico IVE, donde los estudiantes menos vulnerables logran mejores resultados académicos” (Trebilcock Kelly, Muñoz, Martín, & Piderit-Moreno, 2017). Este estudio es particularmente relevante, ya que se realizó gracias a un trabajo de campo desplegado a lo largo del país, evaluando en terreno 11 establecimientos educacionales tanto de las zonas norte, centro y sur. Durante el desarrollo de este trabajo, se pudieron obtener los niveles de CO<sub>2</sub> presentes en el aula, como también las temperaturas al interior de la sala de clases. Justamente desde esta última información, se desprende un registro clave, que es la opinión de los estudiantes sobre cuál es la temperatura ideal para ellos, es decir, con la cual ellos experimentan un confort térmico. Si bien el rango es relativamente amplio y depende tanto de la región geográfica como del nivel socio-económico, entre otros factores, la temperatura ideal expresada por los jóvenes se sitúa entre los 14°C y los 21°C.

Este rango de confort térmico no es muy distinto a los que señalan otros autores. Ya en el apartado 3.4.1 de la presente memoria se señalaba que un valor óptimo para invierno oscilaba entre los 20°C. De forma similar, otro estudio afirma que “la temperatura que favorece la actividad mental es la que se sitúa entre los 18 y los 22 grados centígrados”, agregando que “por debajo de esta temperatura el frío provocaría inquietud o nerviosismo” en los estudiantes (Ramos, 2010). A una conclusión similar llega un estudio realizado por estudiantes de la Westview High School, donde descubrieron en base a diversas mediciones, que los estudiantes obtuvieron sus mejores puntajes cuando la temperatura de la sala era de 72°F (22,2°C) (Perez, Montano, & Perez, s.f.).

La temperatura apropiada es considerada como una necesidad básica. Así lo afirma Michelle Olgúí, Psicopedagoga de la organización Educación 2020, señala que el frío genera que el organismo adopte un modo de conservación, buscando distintas formas de elevar la temperatura para sentirse mejor, lo que “afecta directamente la capacidad de concentración y comprensión de los estudiantes” (Olgúí, 2018). Esto sin duda afecta tanto a alumnos como a docentes, que además de sufrir las bajas temperaturas les resulta mucho más difícil seguir adelante con sus clases, ya que “en un aula donde haya excesivo frío, será muy complicado conseguir la atención de los alumnos, ya que están más pendientes de su incomodidad” (Barreda, 2012).

Efectivamente, el cuerpo humano tiene distintos mecanismos automáticos que le permiten mantener su temperatura corporal alrededor de los 37°C, aun cuando el ambiente represente una temperatura mayor o menor a dicho valor. No obstante, existe un rango límite. “Una persona puede ser expuesta a extremos diferentes de temperatura, como una baja de 12.7 °C y un alta de 54.4°C, e igual mantener su temperatura sin alteraciones” afirma la aspirante a Doctorado en medicina Gabriela García Saravia (García & Fuentes, 2018). Es

decir, bajo los 12 grados centígrados de temperatura el cuerpo humano no sería capaz de mantener su temperatura interna cercana a los 37°C, lo cual dificultaría aún más tanto su concentración como también su salud. Y si bien el decreto existente en Chile que regula las temperaturas al interior de las salas de clases indica que se debe garantizar un mínimo de 12°C para educación básica y media, “ decreto actual es insuficiente para proporcionar condiciones para el aprendizaje” (Olguí, 2018).

Sin duda la falta de calefacción y la constante exposición a ambientes de bajas temperaturas afectan tanto el rendimiento escolar como a la salud de los estudiantes, sufriendo enfermedades asociadas a dicha exposición. Especialmente en las estaciones de otoño e invierno, donde aparecen con frecuencia enfermedades como influenza, faringitis y resfrío común, entre otras. Y aún más cuando estos ambientes están compuestos además por altos niveles de material particulado, a los cuales la exposición prolongada puede ser razón suficiente para manifestar en el corto plazo síntomas de irritación de ojos, dificultades para respirar y dolores de cabeza, y a más largo plazo enfermedades más graves como ataques de asma, bronquitis crónica, neumonía e incluso cáncer al pulmón. (Álvarez y Boso, 2018). Por lo mismo, es importante que el aire dentro de la sala de clases “esté en constante cambio, ya que con el pasar del tiempo disminuye la relación oxígeno dificultando la buena oxigenación del cerebro” lo que puede generar “Cefalea (dolor de cabeza), prurito ocular, mareos y nerviosismo” (Jimenez & Vera, 2015), entre otros síntomas. Estas últimas autoras, además, reafirman que la temperatura ideal para el aprendizaje está entre “18 y 22 grados centígrados”, coincidiendo con los otros autores mencionados anteriormente.

El problema de la contaminación dentro de las aulas de clases se hace aún más latente en aquellos establecimientos educacionales que poseen sistemas de calefacción en base a leña. Particularmente en Chile, el 74% de la población, entre la región de O’Higgins y la

región de Aysén, utiliza la leña como su principal combustible para calefacciones y cocina en sus hogares (Gobierno de Chile, 2015). La exposición de los niños y niñas en estos ambientes calefaccionados a leña, tanto en las escuelas como en sus propios hogares, representan serios riesgos para su salud. Se ha demostrado que existe una relación significativa entre el uso de una calefacción a leña en jardines infantiles y enfermedades respiratorias de sus menores (Rivas, Barrios, Dorner, & Osorio, 2008). Otro estudio con conclusiones preocupantes es el realizado por la profesora de ciencias de la salud pública de la Universidad de California, Irva Hertz-Picciotto, en el cual se encuentra una relación significativa entre los hogares donde se quema carbón como combustible y la estatura de los niños durante sus primeros 3 años de vida.

La estatura por edad y sexo estaba asociada de manera significativa con la combustión de carbón en los interiores (...) los niños de 3 años de los hogares donde se quemaba carbón en los interiores resultaron ser en promedio 1.34 cm más bajos, y las niñas, 1.3 cm más bajas (Burton, 2011).

Con un enfoque levemente distinto, la Universidad de Tulsa desarrollo un estudio que consideró el análisis de 70 escuelas primarias, en el cual pudo concluir que “mantener una ventilación adecuada y el confort térmico en las aulas podría mejorar significativamente el rendimiento académico de los estudiantes” (Haverinen-Shaughnessy & Shaughnessy, 2015).

Este último estudio es muy relevante ya que motiva a investigar y buscar soluciones que permitan garantizar un ambiente cómodo para los estudiantes, donde puedan desarrollar todo su potencial y se empiece a derribar paulatinamente la desigualdad que se vive actualmente en el sistema educacional de Chile.

## 4. | METODOLOGÍA

Con el objetivo de poder llevar a la práctica los conceptos desarrollados en el marco teórico, la metodología de este trabajo de memoria se enfoca en la realización de una simulación de eficiencia energética para el sistema de calefacción de un establecimiento educacional en particular, para, de esta manera, poder determinar la importancia de cada uno de los factores que influyen en la obtención de un adecuado confort térmico.

El establecimiento elegido para la realización de este ejercicio fue el Colegio Plazuela de Lo Miranda, de la comuna de Doñihue, en la Región de O'Higgins. Este recinto se ha adjudicado recientemente fondos del Programa de Fortalecimiento de la Educación Escolar Pública, específicamente pertenecientes a la partida “Mejoramiento de Infraestructura Escolar Pública” contenidos en el eje “Proyectos de Conservación 2020”, montos que son entregados por el Ministerio de Educación mediante la Dirección de Educación Pública. Dichos recursos están destinados a financiar un proyecto de “Conservación y Mejora de Infraestructura” presentado por el colegio antes mencionado, en virtud del cual se han podido obtener documentos de carácter público sobre bases técnicas y planimetría del establecimiento, a fin de conocer en detalle tanto la infraestructura actual como también todos los arreglos que están considerados dentro de este proyecto de conservación. En base a dicha información y a el conocimiento de otras variables proporcionadas por el establecimiento, se realizan distintos cálculos de consumo energético y análisis de los resultados para distintos escenarios.

En un primer momento, se analiza el caso denominado “escenario proyectado”, entendiendo éste como la situación en que el proyecto de conservación del Colegio Plazuela esté terminado. Para ello, se realiza un detalle de cálculo para distintas componentes del confort térmico, como lo son las características de la envolvente, las ganancias solares, la

ventilación entre otros factores. Todo ello para determinar la demanda eléctrica que requiere el establecimiento para poder mantener la temperatura interna del aula dentro de un rango ideal. Para esto, se realiza un estudio minucioso del módulo 1 del colegio, para luego mediante una serie de factores de proporcionalidad, determinar la demanda energética total del Colegio Plazuela.

Posteriormente, se realiza un análisis comparativo entre el escenario proyectado y el “escenario actual”, entendiendo este último como la infraestructura del colegio antes de realizar el proyecto impulsado por el colegio. Para ello, se miden los efectos de los trabajos de mejora de infraestructura y de aislación térmica para luego realizar distintas observaciones enfocadas al uso eficiente de la energía.

Finalmente, en base a los análisis realizados, se proponen posibilidades de mejora, las cuales se agrupan en el denominado “escenario propuesto”. En este análisis se incorporan alternativas de suministro energético para cubrir la demanda del Colegio Plazuela. Se estudia las oportunidades de abastecer de energía al sistema de calefacción mediante fuentes renovables, complementando dichas alternativas con análisis de pre-factibilidad económica que permitan al establecimiento visualizar un panorama inicial sobre las inversiones que estas alternativas requieren.

## 5. | RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 Escenario Proyectado

Para poder mantener una temperatura determinada dentro de un recinto resulta fundamental trabajar en torno al concepto del “balance energético”, que, en síntesis, se puede entender como un equilibrio entre el calor que sale y el calor que entra a la envolvente del edificio. Al estudiar las fuentes de ganancia y pérdida de calor, se pueden encontrar algunos conceptos ya descritos en el marco teórico: ganancia solar, pérdidas por ventilación, pérdidas de calor por envolvente, entre otras.

La fórmula guía de balance energético utilizada a lo largo del presente trabajo será una adaptación de la ecuación propuesta en la “Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social” (Bustamante et al., 2009). La fórmula empleada se detallada a continuación:

$$BE \text{ (balance energético)} = (Q + V)\Delta T - (Gs + Gi)[W] \quad (1)$$

Donde cada parámetro representa los siguiente:

*Q*: Energía en forma de calor perdida a través de la envolvente del recinto [W/°C]

*V*: Energía en forma de calor perdida debido a la ventilación del recinto [W/°C]

*Gs*: Ganancias de calor debido a la radiación solar [W]

*Gi*: Ganancias internas de calor [W]

$\Delta T$ : Diferencia entre la temperatura interior y exterior del recinto [°C]

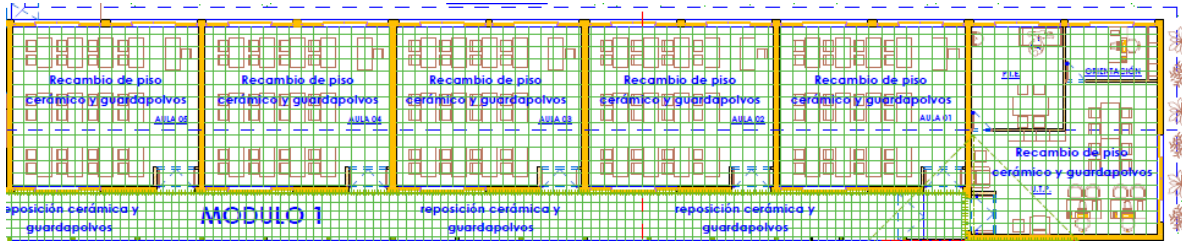
Es importante resaltar que el procedimiento de cálculo exhaustivo a continuación considera únicamente el módulo 1 del Colegio Plazuela, el cual fue elegido para este ejercicio debido a que cuenta con la mayor cantidad de salas de clases, además de ser el edificio de mayor superficie del establecimiento, condiciones que se traducirán en una mayor demanda energética de calefacción.

Para realizar una exposición ordenada de los cálculos de las variables antes señaladas, se presentarán siguiendo un orden descendente según como han sido mencionados.

### 5.1.1. Energía perdida a través de la envolvente

Esta transferencia de calor desde el interior del recinto se debe a las propiedades conductivas que poseen los materiales que conforman la envolvente. Dicho sea de paso, se entenderá como “envolvente” a toda estructura constructiva que separe el ambiente interior del ambiente exterior. Estas estructuras son generalmente, muros, cubiertas y piso. En este punto, el concepto de aislación térmica resulta fundamental y representa en buena medida de la eficiencia de un edificio en términos energéticos.

El módulo 1 del Colegio Plazuela cuenta con 5 salas de clases (idénticas en cuanto a dimensiones) más una sexta sala destinada a docentes y administrativos del establecimiento, tal como se ve en la figura 1.

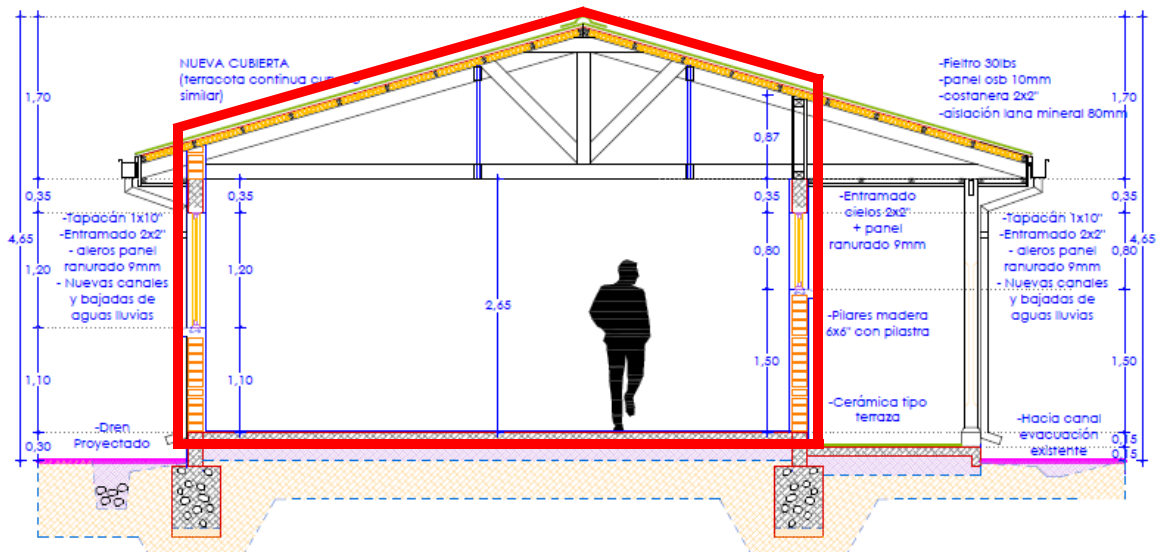


**Figura 1:** Plano del Módulo 1 del Colegio Plazuela de Lo Miranda

A modo de simplificación de cálculo, se ha resuelto que esta última sala sea considerada con las mismas medidas que las otras aulas.

De esta manera, la envolvente queda conformada por una cubierta (o techo), el piso y 4 muros, cuyas orientaciones son Norte (superior), Sur (inferior, que contiene los accesos a cada aula), Oriente (límite derecho de fig.1) y Poniente (límite izquierdo). Para complementar la información de la figura anterior, se muestra una vista de corte transversal al módulo 1,

donde se puede ver la geometría de la envolvente (en rojo), características de la cubierta, además de algunas medidas y detalles adicionales de las elevaciones Norte y Sur.



**Figura 2:** Corte transversal al Módulo 1. Se remarcan los componentes de la envolvente con color rojo, además de presentar otros detalles como altura de ventanas y material aislante de cubierta (en color amarillo), existencia de pasillo exterior, entre otros.

Antes de mencionar los materiales que constituyen la envolvente del edificio, es preciso presentar la fórmula y sus variables. El valor Q (pérdidas de calor por envolvente) se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \Sigma U_i * A_i + \Sigma K L_j * L_j \text{ [W/}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

Donde,

$U_i$ : Transmitancia térmica del material  $i$  [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]

$A_i$ : Superficie del material  $i$  [ $m^2$ ]

$Kl_j$ : Transmitancia térmica lineal del puente térmico  $j$  [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]

$L_j$ : Longitud del puente térmico  $j$  [ $m$ ]

A su vez, el valor de la transmitancia térmica de los materiales (U), se obtiene en base a la orientación del elemento constructivo, su nivel de homogeneidad, la conductividad térmica del material empleado y su respectivo espesor. De esta manera, según la norma chilena 853 Of:2007, el valor U se obtiene de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si}} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (3)$$

Donde,

$R_{se}$ : Resistencia térmica de superficie exterior  $\left[ \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right]$

$R_{si}$ : Resistencia térmica de superficie interior  $\left[ \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right]$

$e_i$ : Espesor del material  $i$  [m]

$\lambda_i$ : Conductividad térmica del material  $i$   $\left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

De esta manera, en base a las fórmulas presentadas y a los documentos de planimetría y especificaciones técnicas del proyecto de conservación del establecimiento, se han podido identificar todos los elementos que componen cada una de las elevaciones de la envolvente del edificio analizado, además de obtener sus respectivos espesores y propiedades conductivas. Una vez realizados los cálculos (cuyos parámetros y valores se detallan en la Tabla I, II y III del Anexo), se ha determinado la cantidad de calor que pierde cada una de las elevaciones, tal como se presenta en la siguiente tabla resumen:

Elevación	Área [m <sup>2</sup> ]	Calor perdido Q[W/°C]	%
Norte	130,5	483,7	26,4%
Sur	130,5	356,0	19,4%
Oriente	24,2	70,1	3,8%
Poniente	23,7	49,4	2,7%
Cubiertas	310,3	126,0	6,9%
Piso	260,9	746,0	40,7%
Total	880,0	1831,2	100%

**Tabla 1:** *Calor perdido por cada una de las 6 caras que componen la envolvente del módulo 1. Se adjuntan los porcentajes de cada una.*

Si bien el área de la elevación está directamente relacionada con la cantidad de calor perdida a través de su superficie, un punto a destacar es la comparación entre las pérdidas de la cubierta y del piso.

Mientras que el piso permite la disipación de cerca de la mitad del calor de la envolvente, la cubierta, que posee un área de un orden de magnitud similar, representa apenas el 6,9% del total del calor perdido. Esto se puede atribuir al efecto que genera la instalación del aislante térmico (lana mineral de 80mm de espesor) entre las planchas de zinc y los paneles de madera, lo cual reduce considerablemente el valor de la transmitancia térmica del techo ( $0,41 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$ , ver tabla II de Anexos), ayudando de forma eficiente a mantener la temperatura al interior del aula, traduciéndose en un aporte significativo para alcanzar un adecuado confort térmico.

Los resultados anteriores también permiten realizar un análisis comparativo entre las elevaciones norte y sur. Éstas poseen una superficie muy similar, sin embargo, se puede apreciar que la elevación norte supera en siete puntos porcentuales la pérdida de calor. Esto se puede entender como consecuencia de una mayor área de ventanas. Tal como se puede ver en la Tabla II del Anexo, las ventanas del recinto, al ser simples (de una sola hoja) y de un espesor relativamente menor (6 mm), representan el valor de transmitancia térmica más alto de todos los elementos que componen la envolvente del edificio (su valor es de  $5,71 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$ ).

Esto representa un problema y a la vez una oportunidad de mejora importante, debido al potencial impacto que tendría un recambio de ventanas con materiales de menor conductividad térmica y a la cantidad de metros cuadrados de la envolvente que actualmente están cubiertos por dichas superficies vidriadas.

### 5.1.2. Energía perdida debido a la ventilación del recinto

Tan importante como alcanzar una buena temperatura es el poder mantener un recinto ventilado. Tanto para regular la humedad al interior de la sala como para mantener una buena calidad de aire, la ventilación cumple un rol principal.

Sin embargo, esto lleva consigo una pérdida natural de calor, ya que el aire interior se debe renovar, permitiendo el ingreso de aire a temperatura ambiente, la cual muchas veces es menor a la de la sala. Tal como se veía en el marco teórico, es necesario que la velocidad de aire oscile entre un 0,1 m/s y 0,2 m/s.

Además, se debe considerar el Decreto 548 (Ministerio de Educación, 1988), en el cual se establece que el colegio debe cumplir con un nivel de ventilación mínima de dos renovaciones totales de aire por hora.

Siguiendo esta última acotación, se ha calculado el volumen de aire dentro de la envolvente, que alcanza los 982,97 [m<sup>3</sup>], para luego calcular las pérdidas de calor por ventilación según la siguiente fórmula:

$$V = 0,34 * Q \left[ \frac{W}{^{\circ}C} \right] \quad (4)$$

Donde Q es el flujo de aire, que debe estar en unidad de  $\left[ \frac{m^3}{hr} \right]$  (Bustamante et al, 2009).

De esta manera, el valor V calculado es el siguiente:

$$V = 0,34 * (2 * 983) = 668,42 [W/^{\circ}C]$$

Considerando el supuesto de que la velocidad del aire sea de 0,15[m/s], siguiendo las indicaciones de velocidad ideal del marco teórico, se calcula que cada una de las 6 salas que componen el módulo 1 debería abrir sus ventanas entre 50 y 70 [cm], prefiriendo la apertura de las ventanas que se encuentren en la elevación sur, debido a su mayor altura, lo que evitaría generar una corriente de aire a nivel de las mesas de los estudiantes.

### 5.1.3. Energía ganada debido a radiación solar

A la hora de analizar los mecanismos de ganancia de calor, el sistema de calefacción no es el único encargado de aportar energía al interior de la envolvente. Tal como se veía en la fórmula 1 presentada anteriormente, uno de las formas en que el aula recibe calor es mediante la radiación del sol, la cual incide tanto en los elementos opacos (muros y cubiertas), como también a través de los elementos vidriados, principalmente ventanas, para este caso. Para cuantificar este aporte energético, se emplea la siguiente fórmula:

$$GS = \left( \sum_i f_{oi} * S_{oi} * \alpha_i * \frac{U_i}{h_e} * E \right) + \left( \sum_j f_{vj} * S_{vj} * FS * E \right) \quad (3)$$

Donde el primer término corresponde a la energía absorbida por los elementos opacos de la envolvente, mientras que el segundo término representa la energía que ingresa a través de los elementos vidriados. Los parámetros representan lo siguiente (Bustamante et al, 2009):

$f_{oi}/f_{vj}$ : Factor de reducción solar o de sombra sobre elemento opaco  $i$ /vidriado  $j$  [-]

$S_{oi}/S_{vj}$ : Superficie del elemento opaco  $i$ /vidriado  $j$  que recibe la radiación solar [ $m^2$ ]

$U$ : Transmitancia térmica del elemento opaco  $i$  [ $W/(m^2 \cdot C)$ ]

$\alpha$ : Coeficiente de absorción del elemento opaco  $i$  [-]

$h_e$ : Coeficiente de convección en superficie exterior [ $W/(m^2 \cdot C)$ ]

$E$ : Radiación Global Horizontal [ $W/(m^2)$ ]

$FS$  = Factor solar del elemento vidriado  $j$  [-]

Tal como se ve en la fórmula 3 las ganancias solares dependen directamente de la radiación solar, cuyo valor oscila durante los distintos meses del año. Sin embargo, para obtener resultados de mayor calidad y precisión, se ha considerado la radiación global horizontal por cada hora, considerando un día promedio, para cada uno de los meses del año. Esto permite realizar un balance energético por cada hora y por cada mes, para obtener un panorama específico tanto de las ganancias solares como también de la demanda energética del edificio.

La tabla con los datos detallados de las ganancias solares se adjunta en la tabla IV del Anexo. Sin embargo, a continuación, se muestra una tabla resumen donde se considera un día promedio para cada mes y se presentan los valores promedios por hora tanto de las ganancias solares del módulo 1, como también de la radiación que recibe la localidad de Lo Miranda, la cual se obtiene desde la herramienta Explorador Solar del Ministerio de Energía.

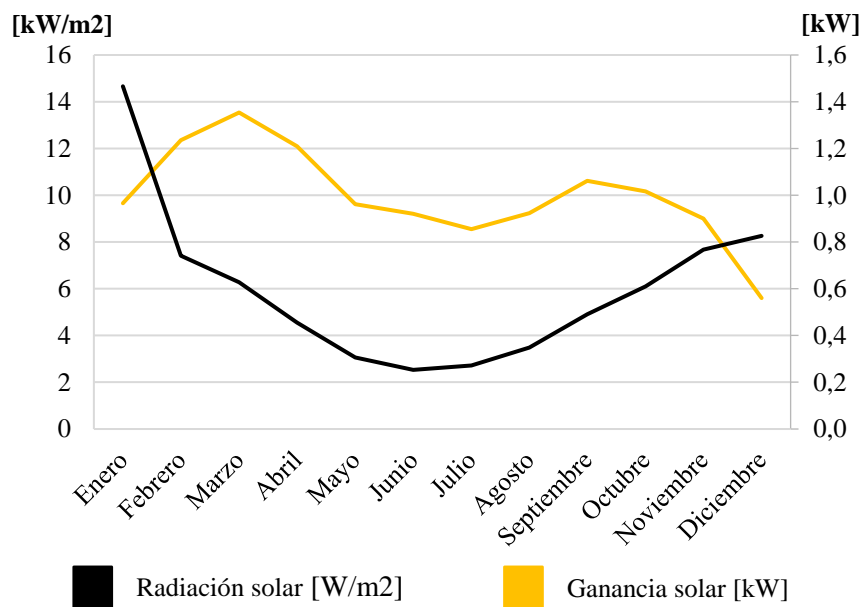
Mes	Ganancia solar [kW/hora]	Radiación global horizontal [kW/(m <sup>2</sup> /hora)]
Enero	9,66	1,47
Febrero	12,36	0,74
Marzo	13,54	0,63
Abril	12,09	0,46
Mayo	9,62	0,31
Junio	9,21	0,25
Julio	8,55	0,27
Agosto	9,24	0,35
Septiembre	10,61	0,49
Octubre	10,16	0,61
Noviembre	9,00	0,77
Diciembre	5,60	0,83

**Tabla 1:** *Calor ganado por la envolvente mediante la radiación solar. La radiación presentada considera tanto la componente directa como la difusa. Valores corresponden a un promedio por hora de un día promedio para cada mes. Se consideran solo las horas de la jornada escolar (8:00-16:00).*

El módulo 1 tiene una orientación norte, lo que implica que las elevaciones que reciben la radiación solar son principalmente el muro oriente y norte, además de la cubierta. Tal como se mostró anteriormente (fig. 2), la elevación sur está cubierta por el techo del pasillo exterior del módulo, lo que impide la incidencia del sol en ese muro.

La orientación del módulo 1 es muy favorable, ya que de esta forma la elevación norte, que cuenta con una amplia superficie, recibe radiación solar durante prácticamente todo el día, generando una gran cantidad de ganancia de calor.

Cuantitativamente, tanto la orientación del módulo como también la existencia de un alero (sección del techo que sobresale del muro) de la elevación norte, originan un fenómeno que se puede ver en el siguiente gráfico:



**Gráfico 1:** Se presenta el comportamiento promedio por hora tanto de la ganancia solar como también de la radiación solar a lo largo del año.

Si bien teóricamente la radiación solar es directamente proporcional a la ganancia solar, las variables restantes de la fórmula generan que, a lo largo del año, se presenten ajustes que favorecen la eficiencia energética y el confort térmico.

En el gráfico anterior se puede apreciar que la ganancia solar “aprovecha” de mejor manera la radiación disponible durante el periodo entre los meses de marzo y septiembre, mientras que el resto de los meses del año la ganancia solar disminuye e incluso muestra comportamientos decrecientes, por más que la radiación solar sea considerablemente mayor. Incluso en diciembre, mes en que se presenta la menor ganancia solar, la radiación solar alcanza prácticamente su punto máximo. Esto último, sin considerar los meses de vacaciones de verano (enero y febrero).

La razón de este fenómeno radica en la elevación del sol y la sombra proyectada por el alero de la elevación norte. Según la herramienta disponible en Sunearthtools.com, en los meses de invierno, se puede apreciar que el sol alcanza una inclinación máxima cercana a los  $35^\circ$ , lo que permite que los rayos incidan directamente en el muro norte y sus ventanas, logrando que el alero genere muy poca sombra y permitiendo obtener una ganancia de calor importante. Sin embargo, durante los meses de verano, dicho ángulo de incidencia aumenta, alcanzando un máximo de casi  $80^\circ$  durante el mes de diciembre, situación en la que el alero, de un ancho de 50 [cm], genera una sombra que cubre prácticamente toda la elevación norte, evitando aumentar la temperatura al interior de las aulas de clases. De esta manera, se evita un sobrecalentamiento durante los meses de mayor calor, mientras que en invierno permite aprovechar al máximo la radiación solar disponible.

#### **5.1.4. Energía de ganancias internas**

Si bien el principal medio de ganancia interna de calor es el propio sistema de calefacción, en este primer momento se omite, justamente para calcular la demanda energética que éste requiere para poder garantizar un buen confort térmico. En este

escenario, se considera como ganancia interna el calor emitido por las personas al interior de la envolvente.

Para cuantificar esta ganancia, se emplea el valor de la tasa metabólica para una actividad de reposo, sentado, según lo estipula la norma ISO 7730:2005 (INEN, 2014). De esta manera, se ha estimado la generación de calor de la siguiente manera:

$$Gi = TM * S * n$$

Donde:

*TM*: Tasa metabólica  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

*S*: superficie corporal promedio de una persona  $[m^2]$

*n*: número de personas dentro del edificio  $[-]$

Empleando la fórmula anterior se determina la ganancia interna de calor del módulo 1:

$$Gi = 58 \left[\frac{W}{m^2}\right] * 1,5[m^2] * 100 = 8700[W]$$

Esta variable se mantiene constante a no ser de una baja significativa en la asistencia de los estudiantes, lo que genere una disminución en la ganancia interna, lo que se traduciría en un aumento de la demanda energética del sistema de calefacción.

#### **5.1.5. Diferencia entre temperatura interior y exterior del recinto**

Los valores Q y V presentados en los puntos anteriores dependen directamente de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior. La cual, para ser determinada, supone como temperatura interior un valor constante de 20°C durante toda la jornada escolar, en base a la investigación realizada durante el marco teórico donde se estipula que dicha temperatura (o una muy cercana) propicia un ambiente óptimo para el desarrollo del proceso de aprendizaje de los estudiantes sin externalidades que afecten su concentración y rendimiento.

Para determinar la temperatura exterior, se han empleado distintos supuestos, en base a la información disponible, recogida de la herramienta Explorador Solar, del Ministerio de Energía. Se adopta el supuesto de que la temperatura tendrá valores discretos a lo largo del día, los cuales se agrupan en intervalos de una hora, lo cual permite realizar una buena aproximación del comportamiento diario, por cada mes, que presenta la temperatura ambiente de la comuna de Doñihue. Los valores empleados se presentan en la tabla V del Anexo.

#### **5.1.6. Determinación de demanda energética para módulo 1**

En base a todas las variables presentadas anteriormente, es posible realizar el cálculo de la demanda energética del módulo estudiado. Siguiendo la línea de las matrices de temperatura y de ganancia solar, se ha calculado una demanda mensual por hora, empleando la fórmula (1), a fin de tener una visión al detalle de la cantidad de energía requerida tanto mensual como también a lo largo del día, la cual se presenta en la tabla VI del Anexo.

Es importante destacar que, para obtener valores precisos sobre la demanda presentada, se considera un tiempo de operación que comienza 15 minutos antes del inicio de clases (8:15 a.m) el cual opera hasta que la temperatura externa sea tal, que el sistema de calefacción sea prescindible para mantener los 20°C, o bien, hasta el fin de la jornada escolar, la cual finaliza, en promedio, a las 15:18 horas. Este promedio se hace necesario dado que, según el horario de funcionamiento del Colegio Plazuela, los días viernes la jornada finaliza a las 13:30 horas, no así el resto de la semana, donde las clases terminan a las 15:45 horas.

Por otra parte, y siguiendo la línea de precisar la demanda energética, se han considerado 22 días de utilidad por mes inicialmente, para luego restar los días feriados según el mes que corresponda y también los periodos de vacaciones de los estudiantes (en los meses de diciembre, enero, febrero y julio). Los resultados totales tanto de demanda energética

mensual para calefaccionar el módulo 1 como también de su respectiva potencia mínima necesaria y los días de uso mensuales, se presentan en la siguiente tabla resumen:

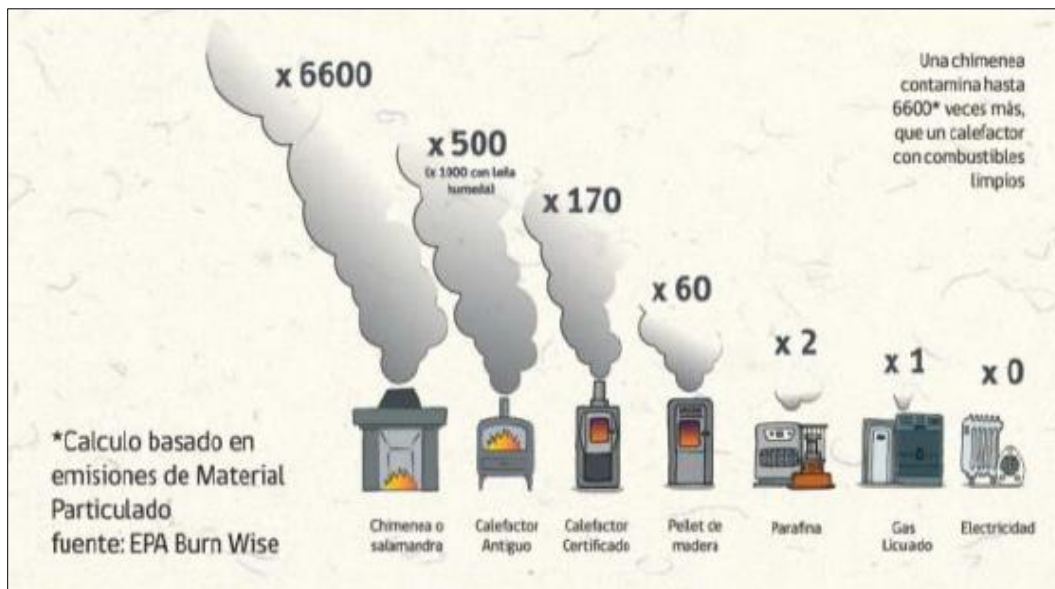
Mes	Demanda Mensual [kWh]	Potencia Mensual [kW]	Días de uso por mes
Enero	0,0	0,0	0
Febrero	0,0	0,0	0
Marzo	55,1	3,3	22
Abril	166,6	10,1	21
Mayo	468,5	17,5	21
Junio	771,7	22,3	22
Julio	526,8	25,9	11
Agosto	947,4	24,1	22
Septiembre	558,4	19,3	20
Octubre	321,0	13,5	21
Noviembre	107,5	6,8	21
Diciembre	23,7	4,5	7

**Tabla 2:** *Demanda energética en forma de calor y potencia necesaria para mantener la temperatura interior de las salas de clases del módulo 1 a una temperatura de 20°C.*

### 5.1.7. Sistema de calefacción y demanda eléctrica

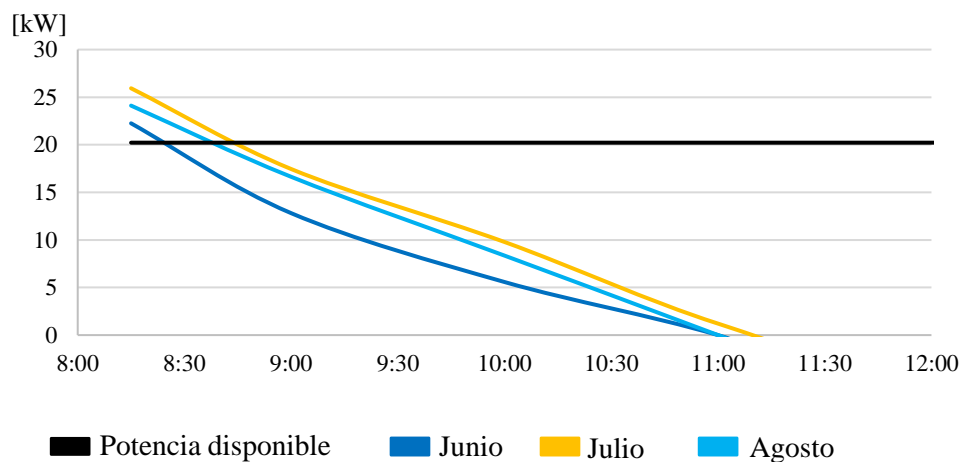
Una vez determinada la cantidad de energía y la potencia necesaria, se consideran los sistemas de calefacción que se contempla adquirir para el establecimiento según lo presentado en las bases técnicas de su proyecto de conservación.

En particular, se considera la adquisición de equipos de aire acondicionado marca Ursus Trotter, u otra de calidad similar, modelo Split Inverter, de potencia 9.000, 12.000 y 24.000 BTU, en función del área que se requiere calefaccionar. Desde el punto de vista de las emisiones que generan los distintos tipos de calefactores, la alternativa de abastecer el sistema de calefacción con electricidad es muy favorable para el medioambiente, como también para los habitantes del recinto, debido a su nula contaminación intradomiciliaria, tal como se puede apreciar en la figura 3.



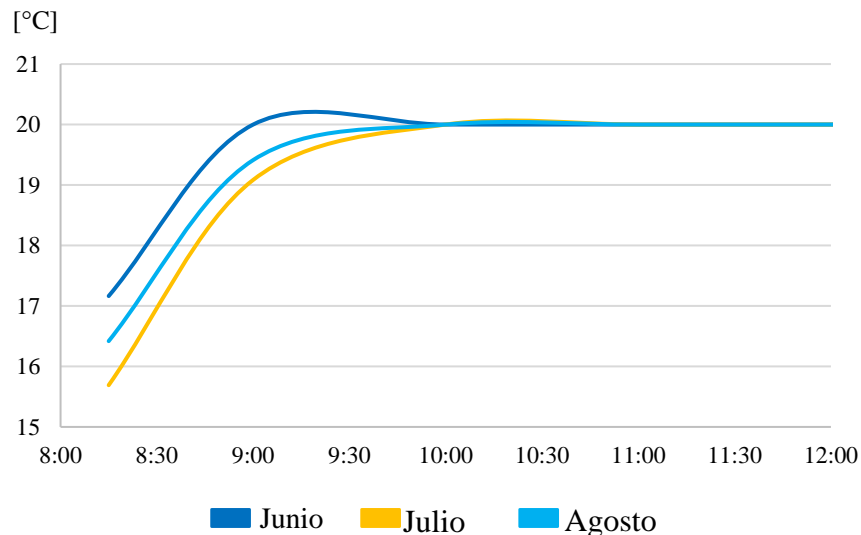
**Figura 3:** Comparación entre distintos sistemas de calefacción y sus respectivos generaciones de material particulado. Fuente: Curso on-line de calefacción sustentable, Academia Adriana Hoffman, Ministerio de Medioambiente.

Para el módulo 1, se considera la instalación de 5 equipos de 12.000 [BTU] (uno en cada sala de clases), más uno de 9.000 [BTU] para la sala de profesores, equipos que en conjunto brindan una potencia instalada de 20,2 [kW]. Este valor es levemente inferior a la potencia mínima necesaria para garantizar una temperatura interna de 20°C en todo momento de la jornada escolar, tal como se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 2:** Potencia requerida en los meses de invierno a lo largo de la jornada escolar para mantener la temperatura del aula a 20°C

Aquello origina que, para las primeras horas de los meses de junio, julio y agosto, las temperaturas internas del aula no alcancen exactamente los 20°C al inicio de la jornada escolar. Se estima que durante la primera media hora de la jornada escolar para los meses antes mencionados, la temperatura de la sala podría oscilar entre los 15,9°C y 17,4°C, los cuales pese a estar bajo el valor ideal, se encuentran muy por sobre la norma (12°C). Sin embargo, los cálculos muestran que desde las 9:30 hrs. aproximadamente en adelante, el sistema de calefacción si está en condiciones de proporcionar un confort térmico de temperatura igual a 20°C. Para todo el resto de los meses del año, la potencia del sistema de calefacción instalada permite una temperatura de 20°C desde el primer minuto de la jornada escolar.



**Gráfico 3:** *Comportamiento de la temperatura interna de la sala durante los meses de invierno, producto del funcionamiento del sistema de calefacción considerado en el proyecto de conservación*

Otro punto a destacar de la elección del sistema de calefacción propuesto en el proyecto de conservación del colegio, tiene relación con la eficiencia energética de los equipos seleccionados. Éstos presentan un etiquetado de eficiencia energética tipo “A”, lo que implica que su coeficiente de rendimiento SCOP es, como mínimo, de 3,4 [W/W].

Etiqueta	Rendimiento en Refrigeración	Rendimiento en Calefacción
A+++	SEER $\geq$ 8,50	SCOP $\geq$ 5,10
A++	6,10 $\leq$ SEER $<$ 8,50	4,60 $\leq$ SCOP $<$ 5,10
A+	5,60 $\leq$ SEER $<$ 6,10	4,00 $\leq$ SCOP $<$ 4,60
A	5,10 $\leq$ SEER $<$ 5,60	3,40 $\leq$ SCOP $<$ 4,00
B	4,60 $\leq$ SEER $<$ 5,10	3,10 $\leq$ SCOP $<$ 3,40
C	4,10 $\leq$ SEER $<$ 4,60	2,80 $\leq$ SCOP $<$ 3,10
D	3,60 $\leq$ SEER $<$ 4,10	2,50 $\leq$ SCOP $<$ 2,80
E	3,10 $\leq$ SEER $<$ 3,60	2,20 $\leq$ SCOP $<$ 2,50
F	2,60 $\leq$ SEER $<$ 3,10	1,90 $\leq$ SCOP $<$ 2,20
G	SEER $<$ 2,60	SCOP $<$ 1,90

**Tabla 3:** Tabla de rendimiento de equipos de aire acondicionado según su etiqueta y modo de operación (refrigeración y calefacción). Fuente: Revista Digital INSEM

Esto quiere decir que, de cada 1 Watt de potencia eléctrica, el calefactor puede brindar una potencia máxima de 3,4 Watts de calor.

Tomando en cuenta todo lo anterior, se puede determinar la demanda eléctrica necesaria para calefaccionar el módulo 1.

Sin embargo, previo a la muestra de dichos valores, se ha realizado una aproximación de la demanda energética y eléctrica total del colegio, en base a la creación de algunos indicadores y su respectivo cálculo en los módulos 2 y 3 del Colegio. En esta oportunidad, no se considera un sistema de calefacción para el casino del colegio, debido a su corto tiempo de uso y a que, en el horario en que los estudiantes lo usan, las temperaturas no bajan de los 15°C (ver tabla V de temperatura exterior en Anexo).

De las cinco variables mostradas en la fórmula 1, se ha creado un indicador para los valores Q y V. Para ello se ha adoptado el supuesto de que la construcción de la envolvente de los módulos 2 y 3 están conformados por los mismos materiales y tienen una altura interior similar a la del módulo 1. De esta forma, se han creado el indicador  $I_Q$ , el cual es considerado como constante para los tres módulos del colegio y que representa la cantidad de calor (Q) que se pierde a través de la envolvente por cada unidad (A) de área del piso de la misma.

$$I_Q = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2} = \frac{Q_3}{A_3}$$

De manera análoga, se han mantenido los mismos supuestos anteriores para la construcción del indicador que aproxima la cantidad de calor que pierden los módulos 2 y 3 debido a la ventilación. De esta forma, el indicador  $I_V$  representa lo siguiente:

$$I_V = \frac{V_1}{A_1} = \frac{V_2}{A_2} = \frac{V_3}{A_3}$$

Para las variables de Ganancia solar ( $G_s$ ) y Ganancia interna ( $G_i$ ), se consideró un porcentaje de los valores del módulo 1, en base a la orientación del edificio y a la cantidad de alumnos que utilizan el recinto, respectivamente. De esta manera, se pudo obtener una aproximación de la demanda eléctrica de cada módulo del colegio, además de su respectiva potencia mínima requerida, información que se muestra en detalle en la tabla VII del Anexo y de forma resumida en la siguiente tabla:

Módulo	Área [m <sup>2</sup> ]	Q [W/°C]	V [W/°C]	G <sub>s</sub> [W]	G <sub>i</sub> [W]	Demanda eléctrica [kWh/año]	Potencia necesaria [kW]
Módulo 1	260,9	1831,2	668,4	100%	100%	1161	25,94
Módulo 2	167,0	1171,7	427,7	60%	80%	623	15,22
Módulo 3	152,9	1073,3	391,8	50%	45%	890	16,42
Total						2674	57,57

**Tabla 4:** Valores de las variables principales ( $Q$ ,  $V$ ,  $G_s$  y  $G_i$ ) utilizadas para cada módulo, para obtener demanda total de Colegio Plazuela.

## 5.2 Comparación entre escenarios Actual y proyectado

Los cálculos presentados al final del capítulo anterior, permiten establecer un punto de partida para realizar una comparación entre la situación actual del Colegio Plazuela y los beneficios que se obtendrán una vez se hayan finalizado los trabajos contemplados en el proyecto de conservación. ¿En qué medida las reparaciones de infraestructura afectarán el confort térmico de los estudiantes?, ¿estas reparaciones permiten que el establecimiento avance en torno a un uso más eficiente de su energía de calefacción? Son algunas de las preguntas que se busca resolver en el presente análisis.

En primer lugar, es necesario identificar aquellos arreglos de infraestructura que afectan alguna de las fórmulas presentadas en el capítulo anterior, ya que existen trabajos, como el arreglo de la fachada del establecimiento, construcción de camarines o cambios de cubierta de patio techado, que no alteran el confort térmico dentro de la sala de clases. Y es, bajo este punto de vista, que se encuentra un trabajo significativo de aislación térmica presente en la mejora de las cubiertas de los módulos 1, 2 y 3.

Particularmente en el módulo 1, en base al cual se han realizado los cálculos de forma minuciosa, los arreglos del escenario proyectado contemplan la instalación de 3 elementos nuevos que anteriormente, en el denominado escenario actual, no constituían parte de la estructura de la cubierta. Estos nuevos materiales son un panel OSB de 10mm, una capa de papel fieltro de 10 Lbs. y una capa de material aislante, específicamente lana mineral de 80 mm. Además, el proyecto busca reparar la cubierta de zinc y los paneles de madera existentes, para resolver problemas de goteras y humedad existentes.

Para evaluar el impacto que tienen dichos trabajos en el confort térmico y la eficiencia energética del edificio, se comparan los valores de la transmitancia térmica antes y después

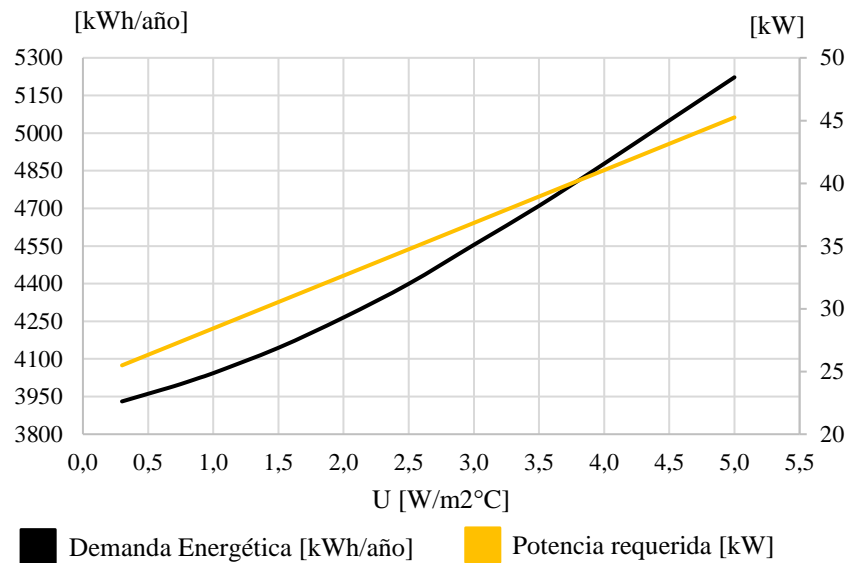
de los trabajos proyectados. Tal como se había mostrado en la Tabla II del Anexo, el valor de transmitancia térmica de la cubierta para el escenario proyectado es de 0,41 [W/m<sup>2</sup>°C]. Cifra que, considerando las condiciones actuales del establecimiento, asciende a 4,54 [W/m<sup>2</sup>°C] como mínimo (considerando que las planchas de zinc y los paneles en mal estado puede aumentar aún más este valor). Los efectos que tiene este aumento se pueden evaluar desde distintas aristas.

Por una parte, tal como se puede ver en la siguiente tabla, el valor del escenario actual (sin aislación térmica) está fuera de norma según indica la Ordenanza General de Construcción y Urbanismo (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2020), mientras que el valor U de la cubierta del escenario proyectado se encuentra dentro del rango que señala la norma.

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U [W/m <sup>2</sup> °C]	Rt [m <sup>2</sup> °C/W]	U [W/m <sup>2</sup> °C]	Rt [m <sup>2</sup> °C/W]	U [W/m <sup>2</sup> °C]	Rt [m <sup>2</sup> °C/W]
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13

**Tabla 5:** *Tabla de valores máximos (U) y mínimos (Rt) que deben tener las estructuras generales que componente la envolvente de un edificio. Lo Miranda corresponde a la zona térmica 3. Fuente: O.G.U.C*

Por otro lado, se ha comparado el efecto que implica el cambio del valor U de la cubierta en los requerimientos energéticos de calefacción del módulo 1. A modo de presentar un panorama más claro, se ha iterado el valor de U desde 0,3 a 5,0 [W/m<sup>2</sup>°C], generando datos que han sido agrupados en el siguiente gráfico:



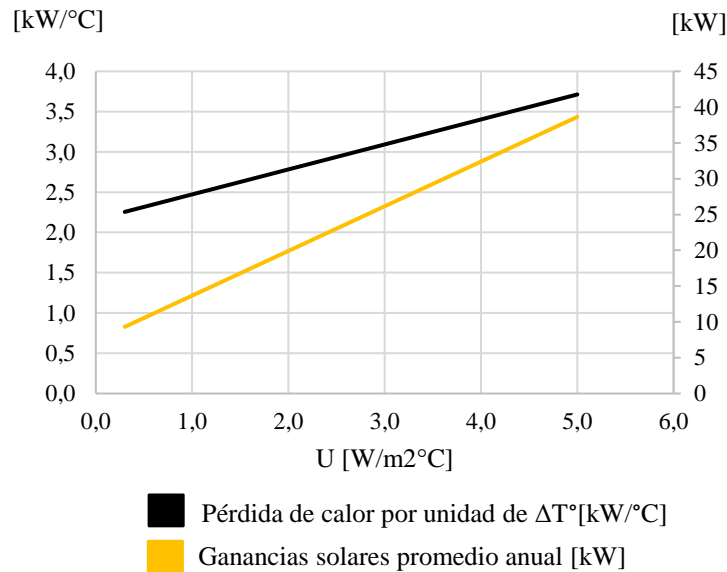
**Gráfico 4:** Comportamiento de la demanda energética y la potencia mínima requerida por el sistema de calefacción para garantizar una temperatura interna de 20°C, para distintos valores U de la cubierta del Módulo 1.

Al observar en el gráfico 4, y tal como se pudiera esperar, los valores de la demanda de energía en forma de calor y de la potencia requerida aumentan conforme se incrementa el valor de U, es decir, mientras la cubierta tenga cada vez menos aislación térmica.

Con esto, se puede afirmar que el trabajo proyectado en la cubierta del módulo 1 representa efectos positivos en relación a la eficiencia energética, logra un valor de U correcto y dentro de la norma. Ya que la curva de demanda presenta un comportamiento tal que su disminución es cada vez menor conforme se reduce el valor de U, se sugiere que, en caso de futuros trabajos de aislación en la envolvente, estos sean instalados en otras elevaciones del edificio, para aprovechar de mejor forma dichos nuevos materiales, debido a que insistir en una nueva reducción de la transmitancia térmica en la cubierta no generaría ahorros de demanda significativos.

Es posible mencionar otras observaciones que se desprenden desde el análisis anterior. Para esto resulta relevante atender la información presentada en el siguiente gráfico, donde

se muestra el comportamiento de las variables  $Q$  y  $G_s$  en función de las iteraciones del valor  $U$ .



**Gráfico 4:** se muestra el comportamiento de las variables  $Q$  y  $G_s$  antes distintos valores de la transmitancia térmica de la cubierta. Pese a no tener exactamente la misma unidad de medida, ambas presentan una pendiente positiva.

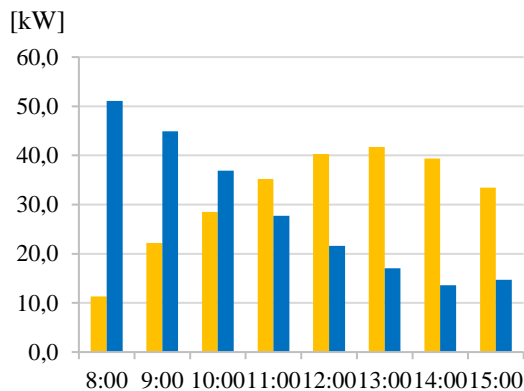
La instalación de aislantes térmicos en la envolvente cumple en un primer momento con un rol fundamental que consiste en retener el calor al interior de aula, minimizando sus pérdidas. Pero, al mismo tiempo, el aislante también funciona como barrera ante las ganancias externas, como por ejemplo la ganancia solar. En el gráfico 5 es claro ver que, mientras el valor  $U$  disminuye, las ganancias debido a la radiación del sol decrecen con mayor rapidez o pendiente que la proporción de calor que se deja de perder.

Este trade-off genera que la demanda energética presente un carácter potencial, generando cada vez menos ahorro antes reducciones del valor  $U$ , reafirmando la sugerencia de intervenir otras elevaciones a la hora de diseñar nuevas instalaciones de aislación térmica.

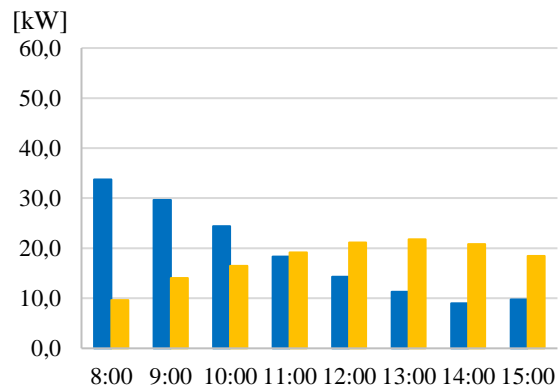
La información del gráfico 5 sugiere que los aislantes resultan ser mucho más eficientes y efectivos para reducir la demanda energética en aquellos elementos en los cuales no incida

la radiación, ya que de esta manera, no se estará impidiendo el ingreso de calor y al mismo tiempo, se están evitando pérdidas energéticas. Las elevaciones del módulo 1 que cuentan con dichas características con la elevación sur (debido al pasillo techado, ver figura 2) y el piso del recinto, las cuales, bajo esta mirada, debieran ser las primeras en recibir un potencial nuevo acondicionamiento térmico.

Por otro lado, y a modo de complementar el análisis anterior, se ha observado el comportamiento de las ganancias y pérdidas totales de calor lo largo del día considerando los tres meses de invierno (junio, julio y agosto), para cada uno de los escenarios estudiados (actual y proyectado). Para ello, se han construido los gráficos 5 y 6 en los cuales se puede ver el efecto que el aislante térmico tiene sobre las variables y también a la hora que el sistema de calefacción podría dejar de funcionar, para ambos escenarios.



**Gráfico 5:** *Comportamiento de las ganancias y pérdidas de calor de las salas en los meses de invierno en el Escenario Actual*

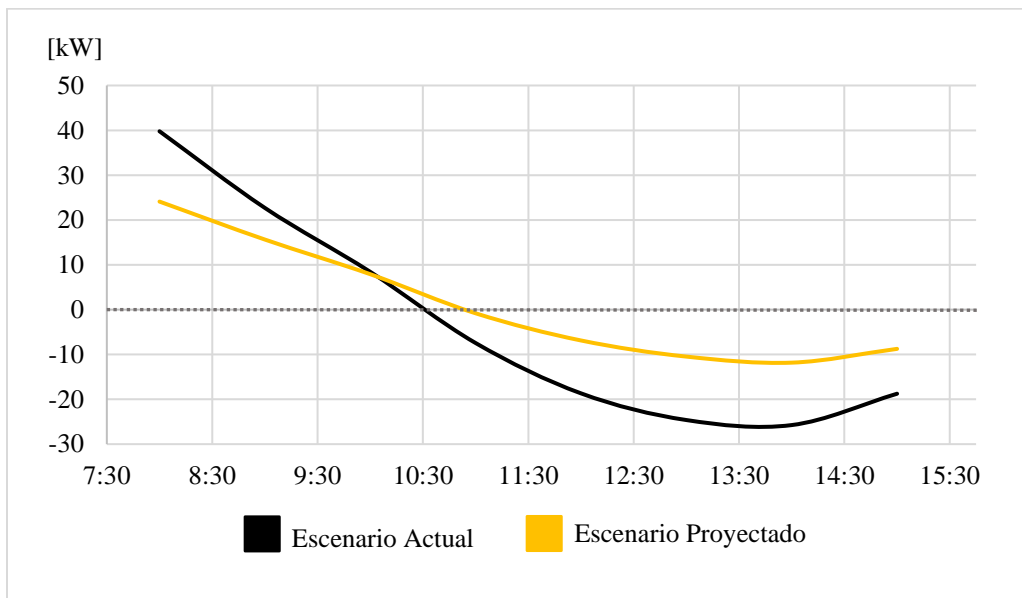


**Gráfico 6:** *Comportamiento de las ganancias y pérdidas de calor de las salas en los meses de invierno en el Escenario Proyectado*

Al analizar los gráficos anteriores, se puede ver el efecto del aislante térmico de la cubierta, logrando disminuir tanto las ganancias (color amarillo) como también las pérdidas de calor (color azul). Las pérdidas se ven disminuidas especialmente en las primeras horas

del día, mientras que las ganancias energéticas ven reducidos sus valores de forma más significativa desde las 10 am en adelante.

Para evaluar el impacto en la potencia requerida para cada escenario y la capacidad instalada con la que deben contar los equipos de calefacción, se construye el gráfico 7 que muestra el balance energético (diferencia entre pérdidas y ganancias de calor) para cada escenario.



**Gráfico 7:** Curva de potencia requerida para mantener la temperatura al interior de la sala de clases a 20°C durante los meses de invierno (junio, julio y agosto)

Se puede observar que la capacidad instalada que debe tener el sistema de calefacción para el escenario actual es considerablemente mayor a la requerida para el escenario proyectado. Es decir, a razón de los trabajos considerados en el proyecto de conservación, serán necesarios menos equipos de acondicionamiento térmico para lograr la misma temperatura interior. Si bien el sistema de calefacción debe funcionar durante un tiempo relativamente más extenso (cerca de 30 minutos según el gráfico), el hecho que los equipos de aire acondicionado sean abastecidos por energía eléctrica, evita cualquier contaminación intradomiciliaria asociada a dicha diferencia en el tiempo de uso.

Por otra parte, y pese a que no se considera dentro del alcance de la presente memoria, se puede observar que una vez que los sistemas de calefacción se hacen prescindibles, la energía necesaria para enfriar la sala (valores negativos de potencia mostrados) es menor para el caso proyectado que para el actual, por lo que el proyecto de conservación significa un avance en la dirección correcta en beneficio de la eficiencia energética y del confort térmico proporcionado a los estudiantes.

Finalmente, el proyecto de conservación del Colegio Plazuela presenta importantes beneficios para las y los apoderados de la comunidad. Esto, porque en el escenario actual, el establecimiento cuenta con un sistema de calefacción mediante el uso de estufas a gas, las cuales son financiadas en un 100% por los apoderados, según datos proporcionados por la Dirección del establecimiento. Se maneja una cifra de que, aproximadamente, el consumo de gas en épocas de pleno invierno alcanza un galón de 15 kg de gas licuado por sala de forma semanal, representando un costo significativo para la comunidad. Es por esto que el nuevo sistema de aire acondicionado que se considera instalar en el colegio, además de prácticamente no generar emisiones de gases contaminantes (ver figura 3), permitirá a las familias un ahorro de recursos importantes dado que una vez finalizado el proyecto de conservación, el sistema de calefacción será financiado íntegramente por el sostenedor, en este caso, la Ilustre Municipalidad de Doñihue.

### 5.3. Escenario Propuesto

En función de lo presentado en el capítulo 5.1, a continuación, se presenta un análisis comparativo entre el escenario proyectado y un nuevo escenario, denominado “propuesto”, donde se incluyen distintas sugerencias enfocadas en aumentar la eficiencia energética del establecimiento, con medidas concretas y sus relativos impactos energéticos y también económicos.

La fórmula del balance energético, ecuación principal del presente trabajo, contienen cuatro variables principales ( $Q$ ,  $V$ ,  $G_s$  y  $G_i$ ). De ellas, tanto las pérdidas por ventilación (normadas por ley), como también las ganancias internas y solares, no permiten mayores gestiones para ajustar dichos valores. La cantidad de estudiantes por sala, la cual por cierto se encuentra dentro de la norma, es inviable de alterar solo para un fin energéticamente más eficiente, ya que iría en contra de la calidad y cantidad de espacio físico disponible para cada alumno. De forma similar, las pérdidas por ventilación no deberían ser modificadas, ya que además de ajustarse a la norma, juegan un rol importante en la mantención de la calidad del aire al interior del aula. De manera más evidente, la radiación solar y la orientación de la infraestructura escolar no presentan posibilidades de modificarse más allá de una simulación teórica.

De esta manera, la variable del balance energético que emerge como la gran oportunidad de poder gestionar son las pérdidas de calor mediante la envolvente de la edificación. Es por esta razón que las soluciones propuestas están relacionadas directamente con reducir esta variable, principalmente con trabajos de aislación térmica.

### 5.3.1 Base comparativa

Previo a analizar las distintas medidas propuestas, es importante definir las bases de cálculo sobre las cuales se evalúan y comparan las distintas alternativas.

En el ámbito energético, se estudian los ahorros que generan cada una de las soluciones propuestas en función de la demanda eléctrica calculada en el capítulo 5.1 para garantizar un confort térmico y una temperatura interior de 20°C y cuyos valores asciende a 1160 kWh/año para calefaccionar el módulo 1 del colegio y de 2674 kWh/año para el establecimiento completo (considerando los módulos 1, 2 y 3). Los detalles mensuales de dichos valores se muestran en la Tabla VII del Anexo.

Para sustentar análisis económicos, se considerará como base de cálculo el ahorro que cada una de las soluciones representa en cuanto al consumo eléctrico de la red distribuidora CGE.

Por gentileza de la directiva del Colegio Plazuela y del departamento de Contabilidad del DAEM Doñihue, se pudo acceder detalladamente al consumo eléctrico y la tarifa contratada por el establecimiento, cuyo desglose se detalla a continuación:

	Ítem	Valor
Costos fijos [\$/cliente]	Administración del servicio	\$ 1.594
	Cargo por potencia presente en punta (20,498kW)	\$ 273.953
	<b>Total</b>	<b>\$ 275.547</b>
Costos variables [\$/kWh]	Precio de energía	\$ 86,9
	Precio por uso de sistema de transmisión	\$ 20,3
	Cargo por servicio público	\$ 0,5
	<b>Total</b>	<b>\$ 108</b>

**Tabla 6:** Tabla construida en base a los precios para clientes con tarifa BT3 de la compañía de distribución eléctrica CGE, empresa que presta servicios de suministro eléctrico al establecimiento Colegio Plazuela.

Es importante destacar que se excluye del presente análisis los distintos cobros por multas por consumo reactivo, pagos atrasados, devoluciones por cortes de suministro, saldos anteriores y cualquier otro monto que modifique el valor final de la boleta mensual de electricidad, dado que son parámetros que están fuera del alcance de gestión para efectos del presente trabajo.

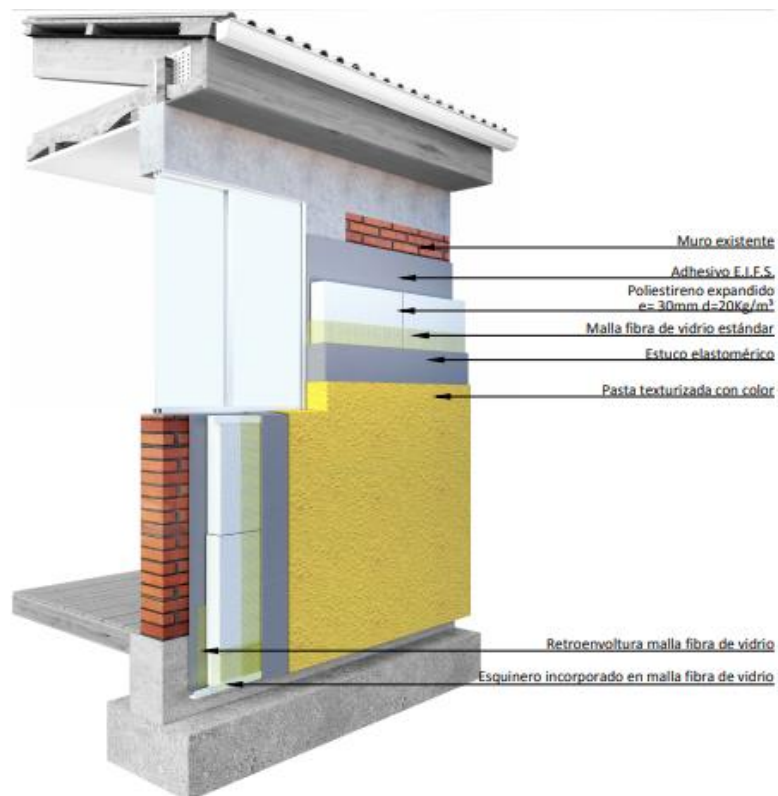
De esta manera, considerando los cargos fijos como un costo hundido, el análisis se enfoca en comparar económicamente las soluciones en función de sus variaciones en el consumo de kilo-watt hora (kwh) y sus respectivos ahorros por conceptos de cargos variables, considerando un costo de 108 [\$/kwh].

### **5.3.2 Sistema de aislación térmica exterior E.I.F.S**

Durante el proceso de investigación se estudiaron distintos proyectos de conservación en distintos establecimientos a lo largo de Chile. La mayoría de ellos se enfocan en trabajos de mejoramiento de infraestructura, muchos de ellos con un foco en la eficiencia energética y aislación térmica. Y justamente para desarrollar esto último, una de las soluciones más utilizadas entre los establecimientos (como por ejemplo la Escuela Clara Solovera en la comuna de El Quisco, la Escuela Juan Bosch en Valdivia o la Escuela Llaima de la ciudad de Temuco), es la instalación del sistema de aislación EIFS (Exterior Insulation Finish Systems). La elección de este sistema se debe a las importantes ventajas que éste posee, permitiendo una instalación rápida y modular, protegiendo la envolvente de la lluvia y de las condensaciones interiores, siendo flexible ante movimientos telúricos, además de reducir las fisuras al proteger la cara exterior del muro, minimizando de esta manera las pérdidas de calor del edificio.

El sistema de aislación EIFS cuenta con cuatro capas principales: fijación, capa aislante, capa impermeabilizante-abierta a la difusión del vapor y resistente al impacto-, y capa exterior de terminación. (Franco, 2018). El espesor de la capa aislante es clave debido a que, en un principio, mientras mayor sea su dimensión, mejor será el efecto aislante de la solución. Sin embargo, desde cierto espesor en adelante, la reducción del calor perdido es despreciable. Debido a lo anterior, se han normado los distintos espesores que debiesen tener las capas aislantes de la solución de aislación EIFS según distintas variables, como la ubicación geográfica, la composición del muro, entre otras. En las fichas de los Planes de Descontaminación Atmosférica del Ministerio de Vivienda y Urbanismo se pueden encontrar dichas regulaciones, para distintas ciudades y regiones de la zona centro sur del país.

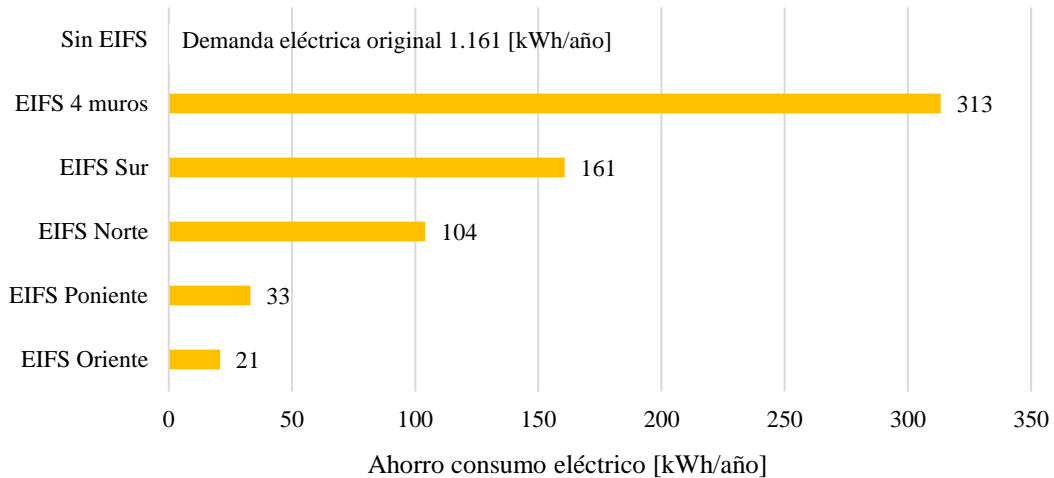
De esta manera se considera la Ficha Constructiva de EIFS sobre muro de albañilería del PDA Curicó (ficha de la ciudad más cercana al Colegio Plazuela debido a que la ficha de región de O'Higgins no está disponible para sistema EIFS en muro de albañilería). Los detalles constructivos se presentan en la figura a continuación:



**Figura 4:** Ficha constructiva PDA Curicó Sistema EIFS sobre muro de albañilería. Imagen muestra las capas y materiales que constituyen la solución constructiva de aislación.

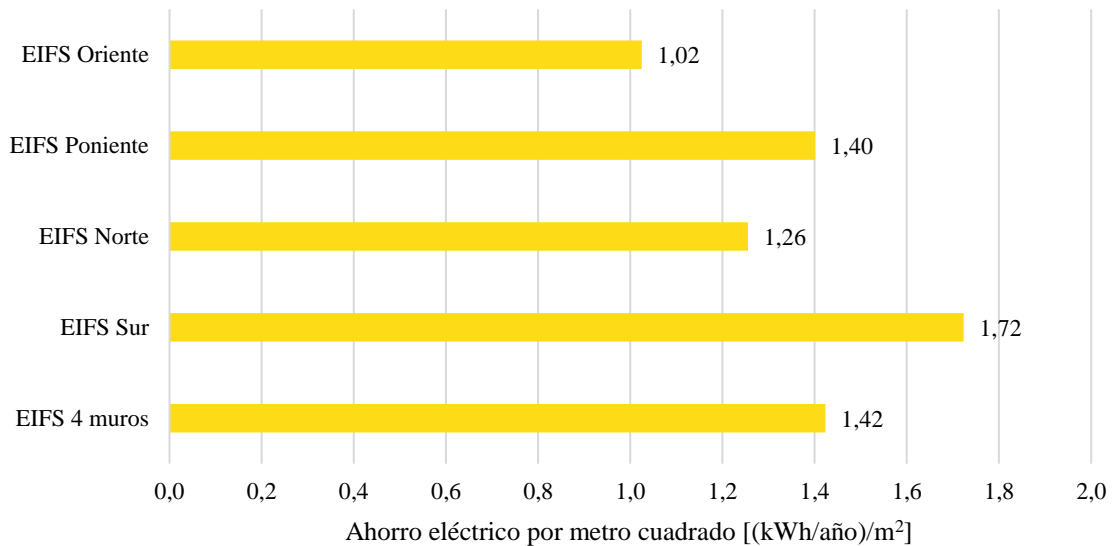
En base a lo anterior y considerando un espesor de la capa de poliestireno expandido de 30 [mm] y densidad aparente de 20 [Kg/m<sup>3</sup>], se estudian los efectos energéticos de la instalación del sistema de aislación EIFS en los distintos muros del módulo 1 del colegio, tanto para la totalidad de las elevaciones como también para cada muro (norte, sur, oriente, poniente) de forma individual.

Los resultados obtenidos se presentan de forma detallada en las tablas VIII y IX del Anexo y de forma resumida en el siguiente gráfico.



**Gráfico 8:** Ahorro de consumo eléctrico que se alcanza con cada una de las soluciones. Esto, manteniendo el requerimiento de temperatura y considerando los equipos detallados en el análisis 5.1.

Es evidente que al instalar la aislación térmica en la totalidad de los muros representa el mayor de los ahorros energéticos. Además, se puede ver la instalación de EIFS en los muros norte y sur representan un ahorro considerablemente mayor al resto de las elevaciones. Esto se deben principalmente a la cantidad de metros cuadrados de cada una de las superficies. Para eliminar dicho sesgo, se presenta el siguiente gráfico, donde se muestra el ahorro eléctrico que implica la instalación de un metro cuadrado de EIFS, según cada una de las 5 soluciones propuestas.



**Gráfico 9:** *Energía eléctrica ahorrada por cada metro cuadrado de sistema de aislación térmica EIFS instalado en cada una de las soluciones propuestas, manteniendo los supuestos y requisitos de temperatura del análisis 5.1*

Recogiendo dicha información, se puede afirmar de manera cuantitativa que el metro cuadrado de EIFS que mayores beneficios energéticos aporta, es el que se instala en el muro de la elevación sur.

Esto coincide y da sustento numérico al análisis anterior realizado en el capítulo 5.2, donde se postulaba que los potenciales nuevos trabajos de aislación térmica se inicien en aquellas elevaciones en las cuales la incidencia del sol es muy menor o nula, debido a que, de esa manera, la aislación juega un rol netamente de conservación del calor disponible, sin actuar como barrera a la radiación y calor externo. Esto mismo se puede complementar apreciando el comportamiento del resto de las elevaciones del gráfico 9. Las elevaciones norte y oriente, las cuales, junto con la cubierta, son los elementos constructivos donde incide directamente la radiación solar, presentan los niveles de ahorro más bajos a la hora de implementar el sistema EIFS, al contrario de las elevaciones sur y poniente.

Finalmente, analizando la información de ambos gráficos, se puede ver que una de las soluciones que demuestra el mayor impacto es la alternativa de aislar térmicamente la totalidad de los muros ya que el ahorro es considerablemente mayor y la disminución de consumo eléctrico por metro cuadrado presenta un valor que solamente es superado por la elevación sur.

### **5.3.3 Ventanas con termopanel (DVH)**

De manera similar al punto anterior, se estudió el efecto que presentaría la instalación de ventanas con termopanel en reemplazo de las existentes ventanas de vidrio simple en el módulo 1. Esta alternativa de mejora térmica, además de ser ampliamente conocida, también ha sido utilizada por otros establecimientos educacionales en el marco de mejoras en su infraestructura y acondicionamiento térmico. Además de los mencionados en el punto anterior, se suman otros establecimientos como el Liceo Arturo Prat Chacón de Puerto Cisnes, la Escuela Fronteriza Lleifén en Futrono o el Centro de Formación académica Perfecto de la Fuente en la comuna de Rinconada, entre muchos otros.

Esta solución contempla la instalación de un panel de doble vidrio con una cámara de aire herméticamente cerrada entre ambos, aumentando de esta manera la resistencia térmica del elemento y ayudando mantener una temperatura más estable al interior de la sala de clases, efecto que trae beneficios tanto para los meses más fríos como también para el verano y las jornadas de temperaturas elevadas.

La solución estudiada, considera un espesor de las ventanas de 6 mm para cada vidrio más un cámara de aire de 12 [mm]. De manera análoga a lo desarrollado con la aislación térmica EIFS, se analiza el comportamiento de la demanda energética ante la implementación de termopanel en cada elevación de forma independiente, para luego realizar un análisis con

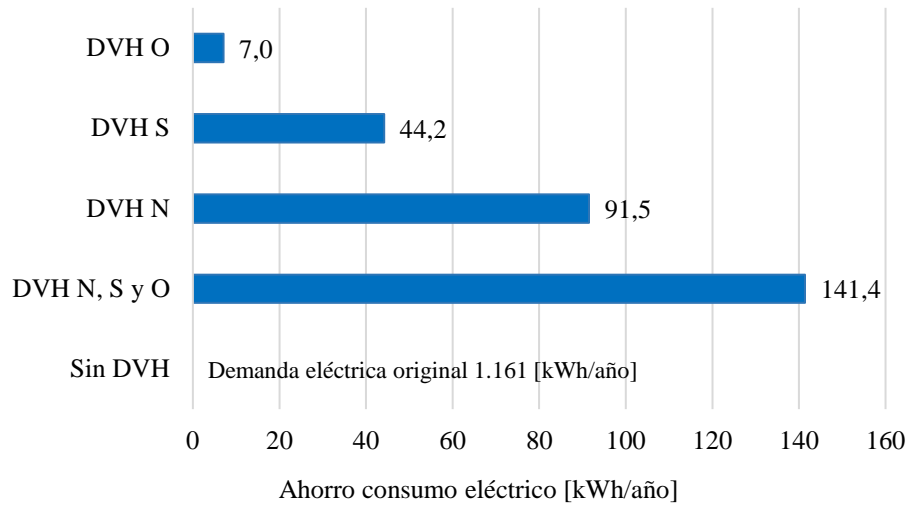
la implementación de dicha solución térmica en todas las elevaciones del módulo 1. Cabe destacar que, según como se ha definido la envolvente estudiada, el muro de la elevación poniente carece de superficie vidriada, razón por la cual las soluciones se reducen a cuatro alternativas.

Previo al análisis de resultados es importante destacar que las ventanas con termopanel implican una variación en dos parámetros de la envolvente.

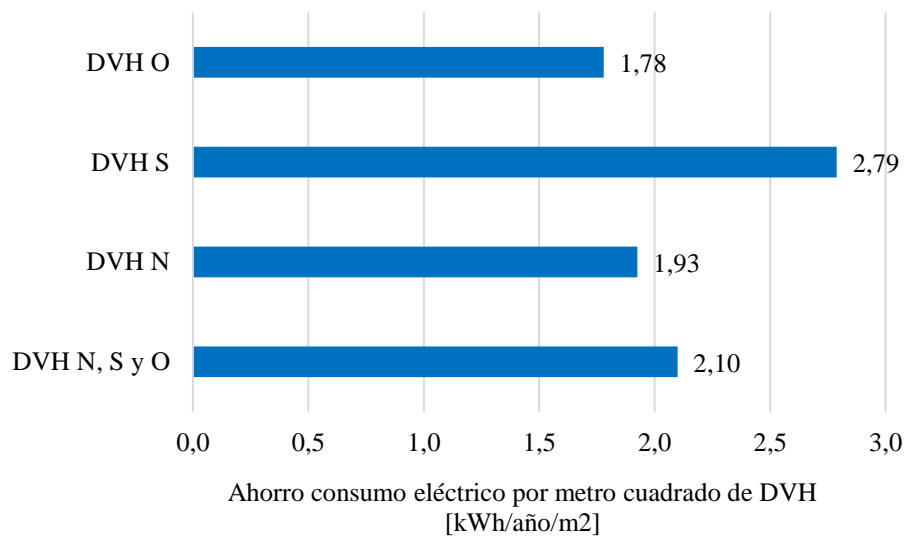
Por una parte, la transmitancia térmica  $U$  de las ventanas se ve reducida de un 5,7 [W/m<sup>2</sup>°C] (valor de  $U$  más alto entre todos los elementos que componen la envolvente) a 3,12 [W/m<sup>2</sup>°C]. Esto genera una reducción importante en la variable  $Q$  de pérdidas de calor por la envolvente.

Por otro lado, el termopanel implica que la variable de Factor Solar (FS), utilizada para calcular las ganancias solares sobre superficies vidriadas, ve aumentado su valor de 0,76 a 0,86 (Bustamante et.al, 2009). Esto genera un efecto en las ganancias solares, disminuyendo su valor en función de los parámetros presentados en el punto 5.1.3.

Los resultados detallados se presentan en las tablas X y XI del anexo. Sin embargo, a modo de posibilitar comparaciones objetivas entre las distintas soluciones propuestas, se construyen gráficos 10 y 11, los cuales son similares a los presentados en el ítem de aislación térmica EIFS, poseen las mismas unidades de medida y se presentan de forma consecutiva a continuación:



**Gráfico 10:** Ahorro eléctrico que implica la instalación de ventanas de termopanel en cada una de las 3 elevaciones que contemplan superficies vidriadas de forma individual (norte, Sur y Oriente) además de la alternativa conjunta de todas las anteriores.



**Gráfico 11:** Energía eléctrica ahorrada por cada metro cuadrado de ventana con termopanel (DVH) instalado en cada una de las soluciones propuestas, manteniendo los supuestos y requisitos de temperatura del análisis 5.1.

Una vez más, queda expresado de forma cuantitativa que el metro cuadrado de termopanel que representa mayor beneficio energético es aquel instalado en el muro sur. Además, el ahorro por metro cuadrado de DVH en el muro sur (2,79 [kWh/año/m<sup>2</sup>]) es mayor al ahorro por unidad de superficie que genera la instalación de EIFS en la misma elevación (1,72[kWh/año/m<sup>2</sup>]), lo cual, pese a tener que requerir de análisis con variables adicionales como ahorro total y costos para complementar el estudio, permite afirmar que las ventanas de termopanel resultan ser más eficientes que la aislación térmica de exteriores por cada metro cuadrado de solución constructiva.

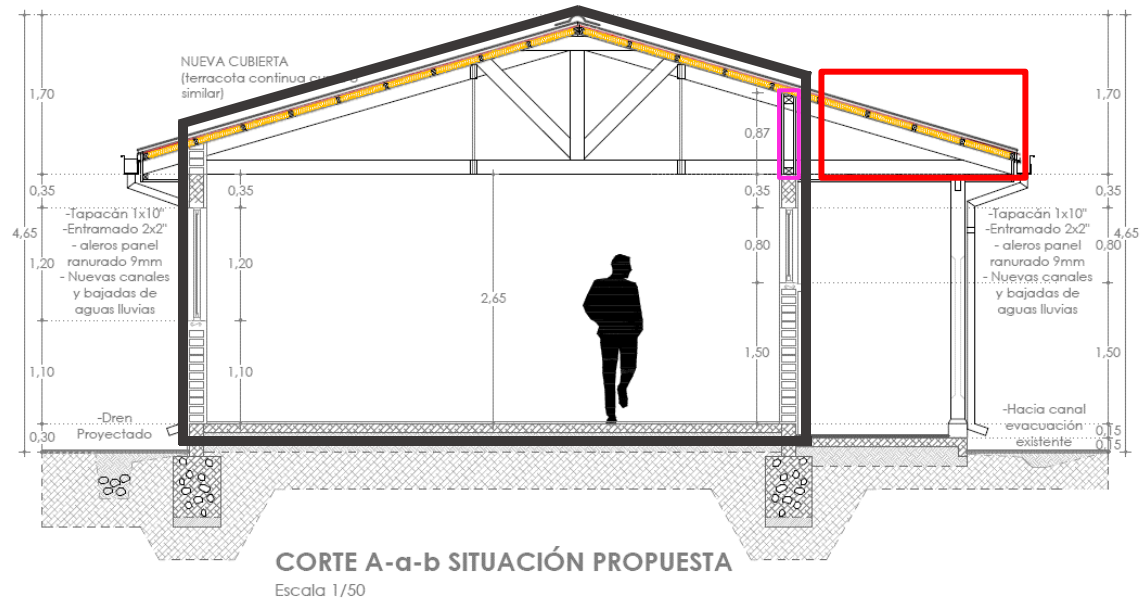
De manera similar, la alternativa que considera la instalación de doble vidrio hermético en todas las elevaciones que contienen superficies variadas presenta un ahorro por unidad de superficie (2,1 [kWh/año/m<sup>2</sup>]) que es mayor al que generaría la instalación del sistema EIFS en todas las elevaciones del módulo 1 (1,42 [kWh/año/m<sup>2</sup>]). Sin embargo, en términos generales, esta última solución generaría ahorros que, en términos absolutos, son mayores a los que se podrían alcanzar con las soluciones de termopanel. Por lo mismo, no es posible afirmar aun qué alternativa se recomienda instalar, antes de complementar dicha comparación con algunas de las observaciones y parámetros físicos y económicos.

### **5.3.4 Aislación Muro de terciado sur**

A diferencia de las dos soluciones presentadas anteriormente, esta alternativa no surge desde las opciones que generalmente son más usadas, sino que se origina al momento de analizar los planos del proyecto de conservación.

En el corte A-a del módulo 1 según el documento de planimetría, se presenta la instalación de lana mineral en la cubierta, tal como se analizó en los puntos previos. Sin embargo, se puede ver que dicho material aislante, una vez que termina de cubrir la parte del

techo que compone la envolvente, sigue estando presente en zonas donde se cubren espacios exteriores, como es en este caso, el pasillo cubierto del módulo 1. Tal como se muestra al costado derecho de la figura 5, existe una porción considerable de lana mineral (encerrada en el cuadro rojo) que es usada de forma poco eficiente, al estar instalada lejos de la superficie exterior de la envolvente (demarcada en esta oportunidad con gris oscuro).



**Figura 5:** Corte transversal en dirección Norte-Sur del módulo 1. En amarillo se destaca la lana mineral a instalar según el proyecto de conservación. En morado se destaca el muro de terciado que compone la envolvente del recinto.

Como solución, se propone usar dicha fracción de la lana mineral para que, en vez de permanecer en la zona de la cubierta sobre el pasillo exterior, sea instalada entre los paneles de terciado, destacado con el color morado en la figura 5. De esta manera, se puede aprovechar de forma eficiente los materiales disponibles, logrando generar una reducción en el calor perdido a través de la envolvente.

De forma cualitativa, se calcula el comportamiento de algunas variables como la demanda eléctrica y la potencia, entre otros, tanto para solución según lo proyectado en el

plano como también para la solución propuesta. Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla:

Variables	Unidades	Muro con cámara aire (Proyectado)	Muro con Lana mineral (Propuesto)
U Muro Terciado	[W/m <sup>2</sup> °C]	1,97	0,38
QΔT Sur	[W/°C]	356,0	331,8
QΔT total	[W/°C]	1831,2	1807,0
Demanda eléctrica	[kWh/año]	1160,8	1134,8
Potencia	[kW]	25,9	25,6

**Tabla 7:** *Efectos de la instalación de la lana mineral en las variables de transmitancia térmica U, pérdidas de calor por la envolvente, demanda eléctrica y potencia.*

La principal ventaja que contempla esta solución se sustenta en la disponibilidad de materiales a los cuales se les puede dar un mejor uso en relación con la eficiencia energética del edificio, principalmente el aislante de lana mineral.

Sin embargo, una de las desventajas que esta opción representa es la intervención de un muro que, según el proyecto de conservación, no debería ser modificado, lo que podría originar costos y plazos adicionales. Además, tal como se ve en la tabla 8, los ahorros que genera esta solución tanto en la demanda eléctrica anual como en la potencia son marginales, de 2,2% y 1,3%, respectivamente.

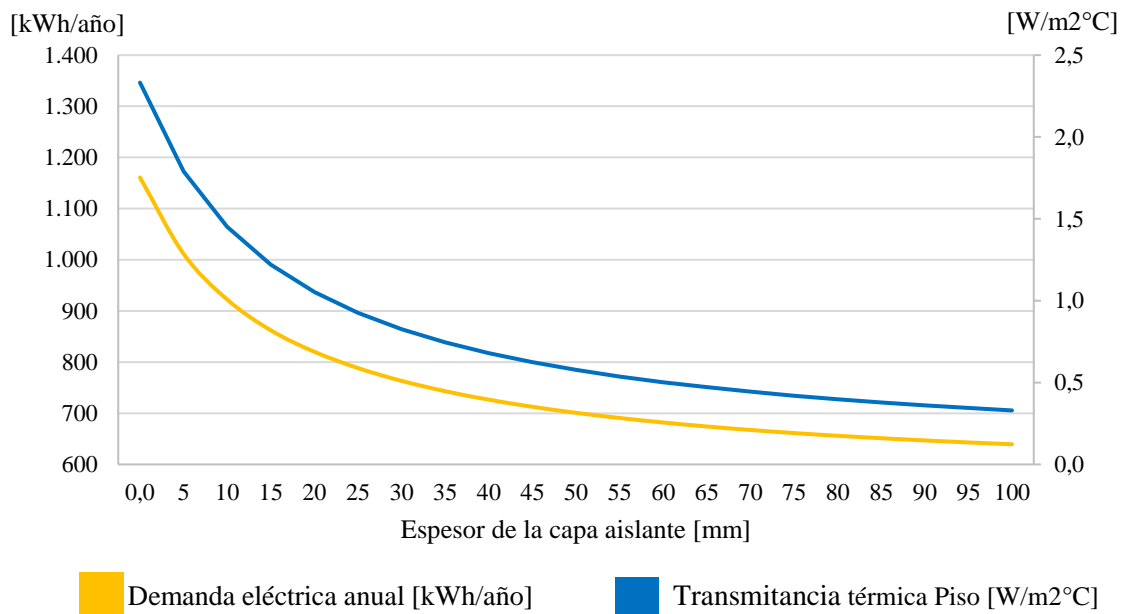
Por lo tanto, si bien esta alternativa representa un ejemplo concreto de aprovechamiento de los recursos disponibles para mejorar el confort térmico, aparentemente no se traduce en un ahorro tan significativo. Por lo mismo, antes de sugerir o descartar su implementación, se complementará su análisis con otras variables a presentar en los siguientes capítulos.

### 5.3.5 Aislación de piso

En base al análisis realizado en el punto 5.1.1, de todos los elementos constructivos que componen la envolvente del módulo 1, el piso es el que más calor pierde, con un 40,7% del total del calor perdido (ver tabla 1).

Debido a lo anterior, se estudia la posibilidad de instalar una capa de material aislante (Aislapol) en el piso, para evaluar en qué medida se lograría reducir tanto las pérdidas de calor como también la demanda energética.

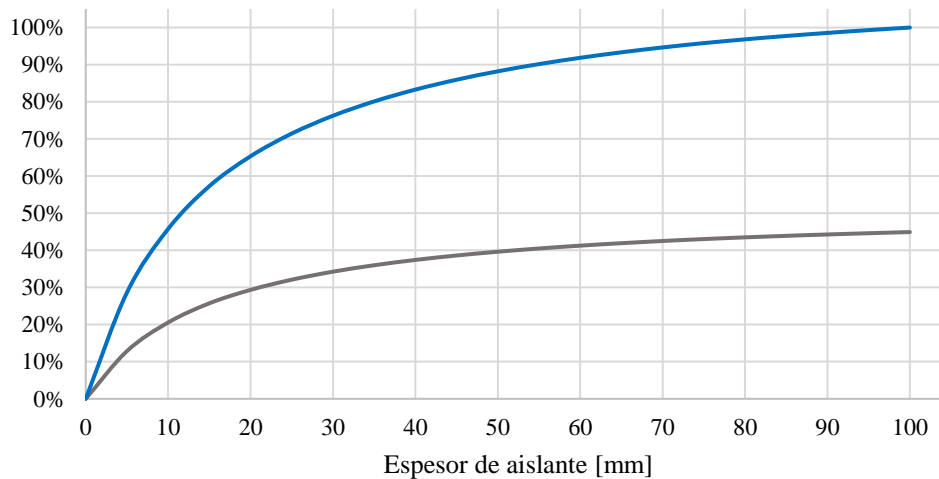
Para efectos del estudio cuantitativo, se han mantenido los espesores de las capas del piso presentadas en el documento de planimetría del proyecto. De esta manera, el único cambio es la adición de la capa aislante. Para determinar el espesor que debe tener esta última, se ha realizado el siguiente gráfico.



**Gráfico 12:** Comportamiento de la transmitancia térmica del piso y de la demanda eléctrica en función de los distintos espesores de la capa de aislante que se propone instalar en el piso.

En base a la información anterior, se puede apreciar que a medida que el espesor de la capa de aislante aumenta, tanto la transmitancia térmica como la demanda eléctrica disminuyen, convergiendo a valores cercanos a  $0,3 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$  y  $640 \text{ [kWh/año]}$ , respectivamente. Lo anterior, considerado como una cota inferior de mejoras, limita el estudio de espesores mayores a  $100 \text{ [mm]}$ .

Es por esto que los ahorros marginales más representativos son aquellos donde el espesor oscila entre los  $5$  y  $20 \text{ mm}$ , para luego, obtener un ahorro que, si bien sigue aumentando, lo hace de forma decreciente hasta alcanzar las cotas inferiores mencionadas anteriormente. Para complementar este análisis, se construye el siguiente gráfico donde se ven los ahorros porcentuales en función de la demanda energética original, tanto absolutos como relativos.



**Gráfico 13:** Muestra los ahorros absolutos y relativos, en porcentaje, según los distintos espesores del material aislante propuesto para el piso del módulo 1

La curva de ahorros en color gris muestra la reducción de la demanda energética con respecto a su valor original ( $1161 \text{ [kWh/año]}$ ). Por otra parte, la curva de ahorros relativos (en color azul) muestra el ahorro respecto al valor mínimo posible de demanda eléctrica,

definido de forma aproximada por la cota inferior 640 [kWh/año] alcanzada con la instalación de un aislante de espesor 100 [mm].

Para traducir la información anterior en alternativas concretas de mejora, se han definidos tres posibles escenarios.

Primer lugar se eligieron los espesores de 10 mm y 20 mm, ya que representan un ahorro absoluto cercano al 20% y 30% respectivamente, representando los mayores ahorros marginales.

Además, se ha determinado estudiar los efectos que implicarían la instalación de un aislante de 40 mm de espesor, ya que con este valor se alcanza alrededor del 80% del ahorro máximo posible, tal como se ve en el gráfico 10.

De esta manera, con las tres alternativas de propuesta definidas, se calculan los efectos energéticos de cada una de las opciones, cuyos respectivos consumos energéticos mensuales se adjuntan en la tabla XII del Anexo y cuyos resultados generales se presentan en la siguiente tabla:

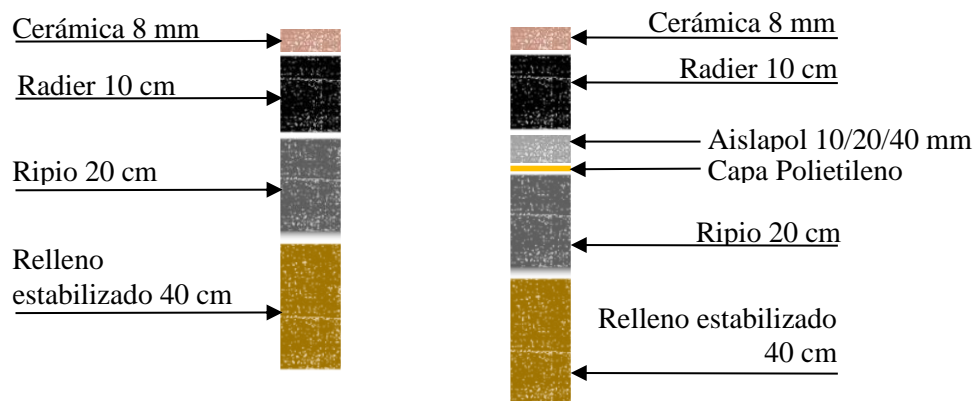
Variables	Unidad	Piso s/aislante (Proyectado)	Piso c/aislante (Propuesto)		
			10 mm	20 mm	40 mm
U Piso	[W/m <sup>2</sup> °C]	2,33	1,45	1,05	0,7
QΔT Piso	[W/°C]	746,0	516,1	412,2	314,9
QΔT total	[W/°C]	1831,2	1601	1497	1400
Demanda energética	[kWh/año]	3946,9	3136	2789	2470
Potencia	[kW]	25,9	22,7	21,3	19,9
Demanda eléctrica	[kWh/año]	1161	922	820	727

**Tabla 8:** Resultados comparativos entre la situación proyectada del módulo 1 y cada una de las 3 soluciones propuestas. Se muestran las variables que se ven más afectadas a las oportunidades de mejora presentadas.

Los números indican que la instalación de aislante en el piso genera beneficios muy importantes en relación con la eficiencia energética, ya que permite reducir en hasta un 37,4% la demanda eléctrica anual y en hasta un 23,1% la potencia mínima requerida para

calefacción. Sin embargo, un punto importante a estudiar es el nivel de intervención que esta alternativa sugiere.

Si bien el proyecto de conservación considera el recambio de las cerámicas del piso de todas las salas del módulo 1, para la instalación de los aislantes se deberían agregar trabajos adicionales de demolición y relleno, para lograr una construcción por capas tal como se muestra en la figura 6.



**Figura 6:** A la derecha, se muestran las capas del piso del Escenario Proyectado, mientras que a la izquierda, se presenta la propuesta de aislación para todas las salas del módulo 1. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se puede afirmar que la solución de aislante en piso, cualquiera sea su espesor, reporta beneficios y ahorros importantes. Sin embargo, la complejidad de las obras y el nivel de intervención de la infraestructura podría originar elevados costos.

### 5.3.6 Paneles Fotovoltáicos

La siguiente propuesta consiste en la instalación de paneles solares. Éstos están compuestos por un conjunto de celdas fotovoltaicas, cuyo funcionamiento consiste, a grandes rasgos, en aprovechar los fotones presentes en la luz solar para que “salte” un electrón, fenómeno que, al repetirse amplia y constantemente, permite generar electricidad. Debido a que el origen de dicha electricidad viene dado por la radiación solar, se considera como una fuente de Energía Renovable No Convencional (ERNC), pudiendo también ser catalogada como energía limpia o renovable.

La naturaleza de la propuesta de instalación de paneles fotovoltaicos en el Colegio Plazuela posee notables diferencias conceptuales con respecto a las alternativas de mejora hasta ahora expuestas. Mientras estas últimas habían puesto su foco en fortalecer la aislación térmica de la envolvente, la propuesta de los paneles solares apunta al origen de la fuente de energía para satisfacer tanto la demanda de calefacción, como también el resto de la demanda eléctrica del establecimiento.

Esto último tiene gran importancia, ya que estas propuestas de energía renovable tienen un impacto más amplio, ya que se estudian en función del colegio completo y no en base netamente a uno de los módulos del colegio. Por ello, es importante señalar que las elecciones, tanto del sistema de aislación como también del equipo de generación solar a utilizar, se realizan en base a análisis independientes.

Dicho lo anterior, se han estudiado dos soluciones de paneles fotovoltaicos, con distintas capacidades, cuya finalidad es mitigar el consumo eléctrico que generan los equipos de aire acondicionado que se instalarán según el proyecto de conservación. Esto, sin perjuicio de que parte de la generación eléctrica podría ir destinada a satisfacer la necesidad del

consumo general del establecimiento (enchufes, luminaria, etc.). Cabe destacar que, para esta primera parte, los cálculos consideran la demanda general del establecimiento completo, más la demanda eléctrica de calefacción únicamente para el módulo 1.

De esta manera entonces, se estudiaron dos conjuntos de paneles de potencia agregada de 1,5 y 3,0 kilo-watt peak [kWp], respectivamente. Para estudiar la distribución del uso de la energía generada, se trabaja con el supuesto de que la energía de los paneles satisface, en un primer momento, toda la demanda de calefacción del módulo 1 que sea capaz de cubrir, para luego, destinar el resto de la energía generada a cubrir la demanda eléctrica general del establecimiento. Y si, una vez cubierta toda la demanda del establecimiento, aún existe energía solar que no haya sido utilizada por ninguna de las dos demandas anteriores, ésta se considera como energía excedente.

Es importante destacar una de las características fundamentales de los paneles fotovoltaicos. La cantidad de energía generada está directamente relacionada con el nivel de radiación existente durante el día. Por lo tanto, los momentos de mayor generación se dan desde el mediodía aproximadamente y durante las primeras horas de la tarde. Si bien en la actualidad existen tecnologías que almacenan la energía generada, dicho análisis se encuentra fuera del alcance de la presente memoria, razón por la cual se trabaja con el supuesto de que la energía generada solo es consumida si se utiliza de forma inmediata.

Además, la generación energética se da de forma continua, los 365 días del año, sin distinción entre los días con y sin clases. Esto implica que, independiente de si la demanda del colegio es o no elevada, la energía se genera de forma constante, dependiendo únicamente del nivel de radiación.

El fenómeno anterior ocasiona un panorama donde la energía generada no siempre puede ser utilizada. Por una parte, se calcula que la totalidad de los días de clases efectivos

en un año ascienden a 188, mientras que 177 son días sin actividad escolar. Además, existe generación de energía que, si bien se da durante un día de clases, se origina posterior al término de la jornada escolar, momento en el cual la demanda ya debería ser considerablemente menor.

A fin de considerar todos los fenómenos anteriormente expuestos, se han tomado distintos supuestos, a modo de poder cuantificar de forma detallada la demanda del colegio, y con ello, medir el aporte de la generación energética solar. En base a las cuentas de suministro eléctrico entregado por la dirección del colegio, se han determinado los siguientes niveles de demanda:

Mes	Demanda general total	Demanda general fija	Demanda general variable	Demanda calefacción M1	Demanda total
Enero	255	255	0	0	255
Febrero	191	191	0	0	191
Marzo	1074	191	883	16	1090
Abril	1653	191	1462	49	1702
Mayo	1740	191	1549	138	1878
Junio	2539	191	2348	227	2766
Julio	2702	191	2511	155	2857
Agosto	2740	191	2549	279	3019
Septiembre	2518	191	2327	164	2682
Octubre	1704	191	1513	94	1798
Noviembre	1485	191	1294	32	1517
Diciembre	1289	191	1098	7	1296

**Tabla 9:** *Demanda de energía eléctrica del Colegio Plazuela considerando los requerimientos generales del establecimiento (enchufes, luminaria etc.) y los requerimientos de calefacción del módulo 1.*

Tal como se puede ver en la tabla anterior, se ha usado como supuesto que el consumo base del establecimiento es igual al consumo del mes de febrero, mes en el cual las actividades escolares y docentes deberían ser las menores del año. De esta manera, los cálculos realizados consideran que la demanda fija se distribuye de forma permanente durante todo el año, mientras que la demanda general variable se distribuye entre los días de

clases efectivos y durante las horas contempladas dentro de la jornada escolar (de 8:00 a.m. a 16:00 hrs, aproximadamente).

Así, los cálculos realizados permiten tener un panorama al detalle de los efectos de la generación energética por paneles solares y el uso que se le da a cada unidad de energía generada. El detalle de la distribución mensual se presenta en la tabla XII del Anexo, mientras que los cálculos totales se presentan de forma resumida en la siguiente tabla:

Variable	Sin PFV	PFV 1,5kW	PFV 3 kW
Demanda general	19.890	19.890	19.890
Demanda calefacción M1	1.161	1.161	1.161
Consumo de red eléctrica CGE	21.051	19.547	18.602
Total Energía Generada (EG)	0	2.178	4.356
EG para calefacción M1	0	125	232
EG para consumo general	0	1.379	2.216
EG excedente	0	675	1.908
Ahorro absoluto red eléctrica	-	1504	2449
Ahorro porcentual red eléctrica	-	7,1%	11,6%

**Tabla 10:** *Requerimientos eléctricos y la distribución de la energía generada entre las distintas demandas. Todos los valores están en unidad de kilo-watt hora anual [kWh/año]*

El análisis comparativo entre ambas opciones de paneles fotovoltaicos indica que, para el caso de 3,0 kW de potencia, la generación de energía es prácticamente el doble que la que genera la solución de 1,5 kW, lo cual tiene sentido debido al carácter modular de los paneles. Sin embargo, vale la pena destacar que algunas variables asociadas a los 3kW de potencia no llegan a duplicar las variables respectivas al escenario de 1,5 kW. Por ejemplo, tanto el uso para calefacción del módulo 1 como el uso general no alcanzan a duplicar sus valores, aumentando en un 85,6% y 60,7% respectivamente. Esto se explica en gran medida porque la energía que queda como excedente está cerca de triplicar su valor con respecto a su valor con 1,5 kW de potencia, con un aumento de 182%. Esto muestra que, mientras más energía se genera, más energía es la que, proporcionalmente, queda como excedente.

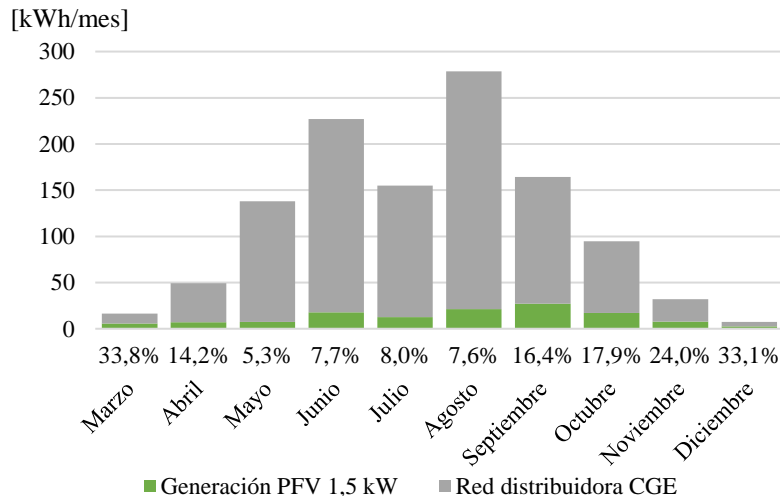
En cuanto al ahorro absoluto y porcentual del consumo del suministro eléctrico obtenido por la red distribución local, los valores de la alternativa de 3 kW tampoco duplican las cifras obtenidas con los paneles de 1,5 kW, lo cual, si bien permite aumentar el ahorro de consumo y de costos respectivos, también desincentiva a analizar soluciones fotovoltaicas con mayores niveles de potencia, dado que el ahorro aumentaría de forma decreciente, contrario al comportamiento de la energía excedente, que, tal como se mencionaba anteriormente, aumenta con mayor proporcionalidad que con la que aumenta la potencia instalada.

Es importante mencionar que, debido a la promulgación de la ley 20.571, los consumidores que cuenten con equipos de generación propia, tienen “ derecho a inyectar la energía que de esta forma generen a la red de distribución a través de los respectivos empalmes” (Diario oficial, 2012) recibiendo un pago por dichos recursos energéticos inyectados. Sin embargo, los precios relacionados a dichos pagos son acordados por la compañía distribuidora y serían menores a las tarifas de venta de la energía, con un valor cercano al 50% del precio al cual se compra la electricidad a la distribuidora (ACESOL, 2019), desincentivando de esta manera a que la instalación de equipos de generación eléctrica por medios renovables no convencionales sea motivada por un fin netamente de comercialización de suministro eléctrico. Los beneficios que el Colegio Plazuela pudiera obtener por medio de la venta de los excedentes generados se calcularán en base a un precio referencial del 50% del valor de compra, alcanzando así los 54 [\$/kWh].

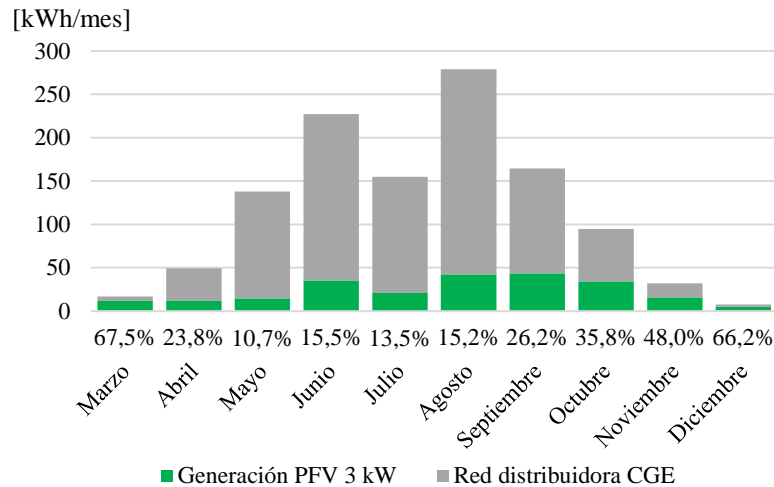
Otro aspecto importante a analizar es que, tal como se muestra en la tabla 11, la cantidad de energía total generada, tanto con potencia de 1,5 kW como también de 3 kW, es mayor a la demanda total de calefacción del módulo 1. En un primer momento se podría pensar que, con esto, la totalidad de los requerimientos eléctricos para calefacción se ven

cubiertos por esta generación de energía renovable. Sin embargo y tal como se explicó anteriormente, la distribución del uso de la energía producida por los paneles se usa en la medida en que esta esté disponible, teniendo una generación importante desde el mediodía en adelante. Lo cual no se alinea con la demanda de calefacción, ya que ésta presenta sus valores máximos a primera hora de la mañana, para luego ir disminuyendo hasta ser totalmente prescindible cerca de las 11 hrs, aproximadamente. Esto genera efectos como los que se presentan a continuación, donde la energía generada aporta de forma marginal a cubrir la demanda eléctrica para calefacción. Los valores totales presentados en la tabla 11 ya dan cuenta de lo anterior, donde, para los casos de 1,5 kW y 3 kW, la energía destinada a calefacción representa solo el 5,7% y 5,3% del total de la energía generada, respectivamente.

El comportamiento mensual del aporte de la energía solar en la calefacción, producidas tanto por el caso 1,5 kW como el de 3 kW se presentan en los siguientes gráficos:



**Gráfico 14:** Aportes tanto de la energía eléctrica generada por los paneles solares de 1,5 kW de potencia como también de la red de distribución para satisfacer la demanda de calefacción del módulo 1.



**Gráfico 15:** Aportes tanto de la energía eléctrica generada por los paneles solares de 3 kW de potencia como también de la red de distribución para satisfacer la demanda de calefacción del módulo 1

Los gráficos anteriores muestran que el aporte de la generación solar es relativamente bajo, cuyo porcentaje de contribución se hace menor en los meses de invierno, justamente donde la calefacción se hace más necesaria.

Debido a todo lo anterior, se puede afirmar que el aporte energético por parte de los paneles fotovoltaicos representa un ahorro importante de energía, lo cual tiene beneficios significativos debido a la reducción de requerimientos de suministro eléctrico de la red local de distribución como también a los ingresos adicionales asociados a la inyección de excedentes a la red.

No obstante, dicha fuente de energía no es recomendable si lo que se busca es satisfacer la demanda de calefacción de forma independiente, debido a que la baja radiación y la diferencia horaria entre la demanda y la disponibilidad energética producen que el aporte efectivo de los paneles al sistema de calefacción sea mínimo. Esto permite descartar la idea de contar con un sistema de paneles off-grid para hacerse cargo del abastecimiento de la calefacción, ya que no es posible ser independientes de la red eléctrica para garantizar una temperatura mínima de 20°C a toda hora al interior de las salas de clases del módulo 1.

### **5.3.7 Análisis económico y definición de propuesta**

Indudablemente cada una de las soluciones presentadas anteriormente generan un beneficio para el Colegio Plazuela en materias de eficiencia energética. Sin embargo, existen alternativas que son mejores o en cuanto al ahorro que representan o también a su costo asociado. Es por esto que, complementando los análisis anteriores, se realiza un estudio económico para poder identificar cuáles son las mejores soluciones a proponer, tanto desde el ámbito energético como también desde el económico.

#### **Elección de aislante propuesto**

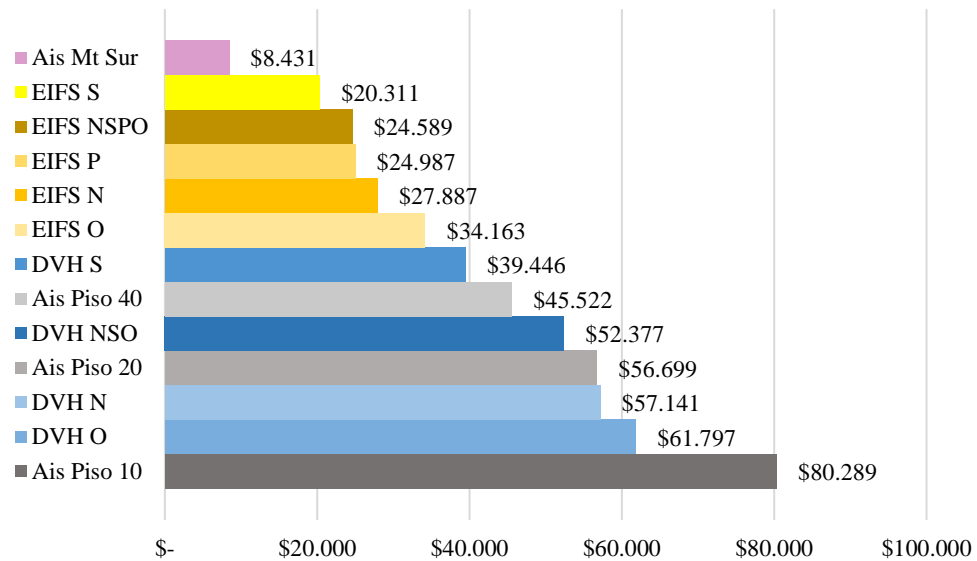
En primer lugar, se determinaron precios de referencia para cada uno de los trabajos descritos anteriormente. Estos precios de referencia se construyeron considerando información desde distintas fuentes, como trabajos de obra similares en otros proyectos de conservación en establecimientos educacionales, cotizaciones en diferentes empresas de comercialización de materiales de construcción y opiniones de ingenieros civiles expertos en construcción.

Lo anterior con el objetivo de converger a un valor que, si bien puede no ser exacto, si logre reportar una referencia correcta sobre los costos que representa cada alternativa. En la tabla siguiente se pueden encontrar los datos sobre precios y áreas a intervenir, a fin de estimar los costos totales de cada obra analizada.

Solución	Precio referencia [\$/m <sup>2</sup> ]	Área total [m <sup>2</sup> ]	Costo total obra [\$/]
EIFS	\$	35.000	
Todos los muros		220,1	\$ 7.704.743
Muro Norte		83,0	\$ 2.903.250
Muro Sur		93,2	\$ 3.263.400
Muro Poniente		23,7	\$ 828.179
Muro Oriente		20,3	\$ 709.914
Aislación muro terciado sur	\$	14.433	\$ 219.696
Ventana termopanel	\$	110.000	
Ventana Sur		15,8	\$ 1.742.400
Ventanas Norte		47,5	\$ 5.227.200
Ventanas Oriente		4,0	\$ 435.600
Todas las ventanas		67,3	\$ 7.405.200
Aislación piso		260,94	
Aislante 10mm	\$	73.420	\$ 19.158.096
Aislante 20mm	\$	74.021	\$ 19.315.105
Aislante 40mm	\$	75.759	\$ 19.768.602

**Tabla 11:** Detalle de costos de cada una de las soluciones, tanto por unidad de área como totales, con sus respectivas variaciones.

Considerando la información anterior y también el análisis energético realizados en los puntos anteriores sobre cada solución propuesta, se construye un indicador, denominado “costo-eficiencia”, el cual se obtiene realizando el cociente entre el costo total de la obra y el ahorro energético anual que la solución respectiva reporta. En virtud de lo cual, su unidad de medida es [\$/kWh/año]. Con esto se busca combinar los análisis económicos y energéticos para presentar un panorama objetivo y completo sobre los efectos de las soluciones analizadas. Para presentar dicho panorama de forma clara, se ha construido el siguiente gráfico de barras:



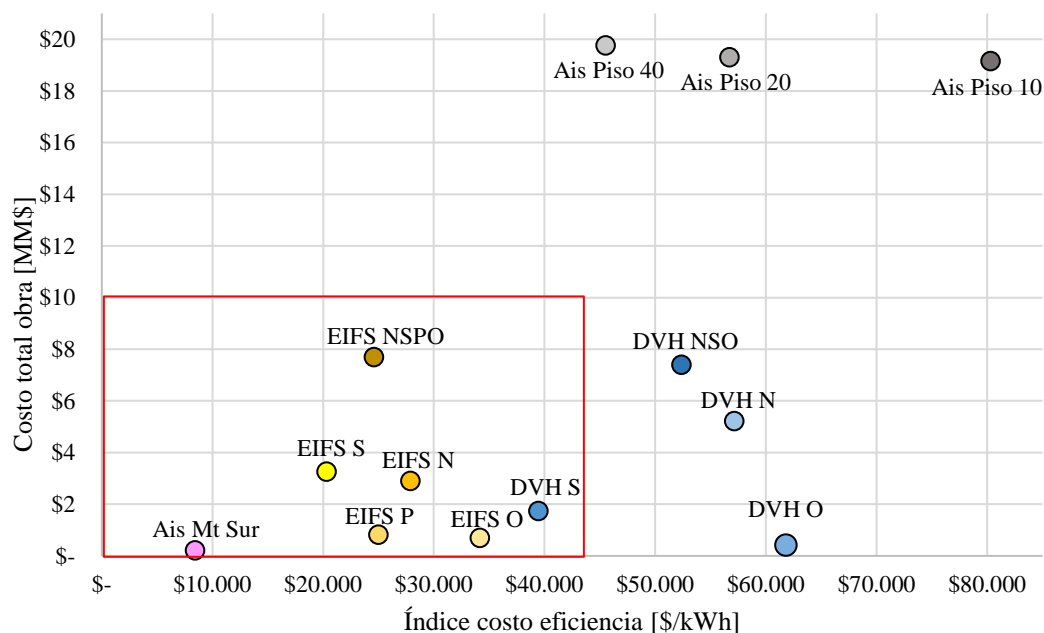
**Gráfico 16:** Grafico de indicador “Costo-Eficiencia” para cada una de las soluciones estudiadas. La unidad de medida es [ $\$/(\text{kWh/año})$ ].

Es importante destacar que el mencionado indicador no considera un horizonte de cálculo de varios periodos, simplemente realiza el cociente entre las variables de ahorro anual [ $\text{kWh/año}$ ] y costo total de obra a modo de poder combinar ambos análisis e identificar las alternativas más convenientes económica y energéticamente.

Del gráfico 16 se pueden obtener diferentes conclusiones. En primer lugar, se puede apreciar que las alternativas de aislación térmica de muros con sistema EIFS (en tonos amarillos), en todas las combinaciones de aplicación presentadas, son más convenientes que la instalación de ventanas con termopanel y de aislación de pisos. Además, se puede apreciar que la solución de aislación del muro de terciado de la elevación sur, usando como material aislante parte de la lana mineral que no está adosada a la envolvente, se alza como la alternativa más eficiente, es decir, con la cual se logra reducir una unidad de energía [ $\text{kWh}$ ] al año al menor costo posible.

Pese a la notoria diferencia existente entre los indicadores de las distintas alternativas, no es posible cuantificar el impacto absoluto del ahorro que cada solución representa, ni tampoco su costo total de obra.

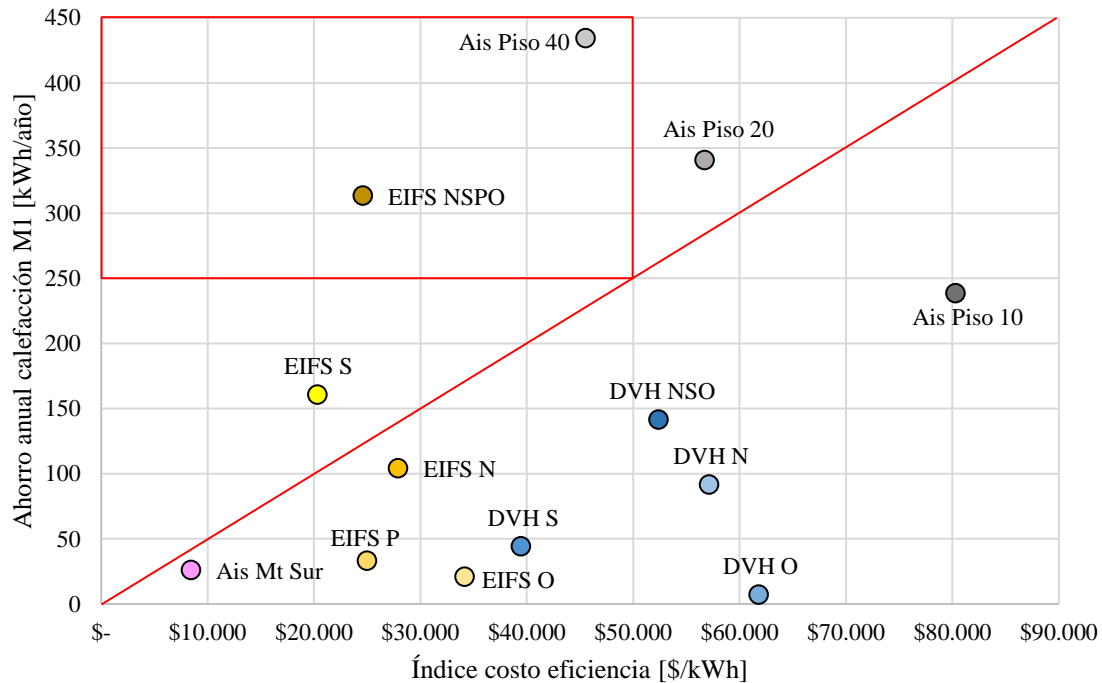
Por lo anterior, se han elaborado gráficos complementarios. El primero de ellos (gráfico 17) realiza un cruce entre los costos totales y el indicador de costo eficiencia. Se busca identificar las alternativas que posean tanto un bajo valor del indicador costo-eficiencia, como también un bajo valor en el eje vertical. Dado lo anterior, se definen los límites con el rectángulo rojo, el cual encierra las alternativas con mejores índices según el mencionado gráfico



**Gráfico 17:** *presenta los valores del índice de costo-eficiencia en perspectiva con los costos totales de obras respectivos de cada solución.*

Por otra parte, el gráfico 18 muestra la distribución de las soluciones tanto en función del índice costo-eficiencia como también del ahorro absoluto anual que reporta cada propuesta. En él, se identifican las soluciones que, además de presentar los menores valores

del índice de costo-eficiencia, reportan el mayor ahorro anual. Dichas oportunidades de mejora, se delimitan por el rectángulo rojo. Además, se traza una diagonal del mismo color, para identificar qué alternativas se encuentran en la mitad superior del plano, pudiendo encontrar dos soluciones más (EIFS S y Ais Piso 20) que presentan buenos resultados.



**Gráfico 18:** Distribución de las soluciones en base a los parámetros de ahorro anual e índice Coste-Eficiencia.

En base a los últimos tres gráficos presentados se puede apreciar que la alternativa de instalación de aislante EIFS en todos los muros del módulo 1 se encuentra siempre entre las mejores alternativas. Si bien las alternativas de aislar el piso representan los ahorros más elevados, su alto costo de obra hace descartar dicha solución.

Las ventanas termopanel, si bien generan ahorros significativos de energía, su alto costo en comparación con el sistema EIFS hacen privilegiar este último para un primer trabajo de aislación termia en el recinto. Además, se opta por incluir la alternativa de aislación en el muro de terciado sur, debido a su valor de índice de costo eficiencia.

De esta manera, se determina que la propuesta de aislación térmica estará compuesta por un sistema de aislación EIFS en los cuatro muros del módulo 1, más los trabajos de aislación en el muro de terciado sur dando un uso más eficiente al material aislante disponible

### **Definición de alternativa de panel solar a proponer**

Para cuantificar los beneficios económicos de las dos soluciones de paneles solares estudiadas, se dividen en dos grupos principales. Por una parte, están los ahorros de suministro eléctrico abastecido desde la red de distribución local, debido a los aportes de electricidad generada por los paneles. Y, por otro lado, los ingresos relacionados con los excedentes energéticos vendidos e inyectados a la red. La información anterior, más otros parámetros relevantes, se pueden observar en la tabla 13. En ella, se puede apreciar los costos totales de obra, que son un precio de referencia que considera la instalación, el inversor on-grid y el medidor bidireccional, aparatos necesarios para el correcto funcionamiento de los paneles.

Variable	1,5 kW	3 kW
Ahorro de red anual	\$ 161.913	\$ 263.703
Venta Excedentes anuales	\$ 36.341	\$ 102.743
Costo total de obra	\$ 2.788.900	\$ 4.328.900
Índice costo eficiencia[\$/(kWh/año)]	\$ 1.855	\$ 1.768
Payback [años]	14,1	11,8

**Tabla 12:** *Resultados económicos de las dos alternativas de paneles fotovoltaicos estudiados.*

Los valores obtenidos en las variables de ahorro y venta de excedentes son resultados del análisis energético realizado en el punto anterior, donde se ve que los excedentes aumentan casi el triple entre la opción de 1,5 kW y la de 3 kW. Además, se calcula el índice costo eficiencia de igual forma que para las soluciones de aislante, obteniéndose un valor más económico para la opción de 3kW de potencia. De forma complementaria, se calcula de

forma simple el payback de ambas opciones, obteniéndose como resultado que la inversión se recupera cerca de dos años antes para la alternativa de 3 kW, que para la opción de menor potencia.

Debido a todo lo anterior, se propone la instalación de un equipo de paneles fotovoltaicos de 3 kW de potencia.

### 5.3.8 Beneficios de Propuesta final

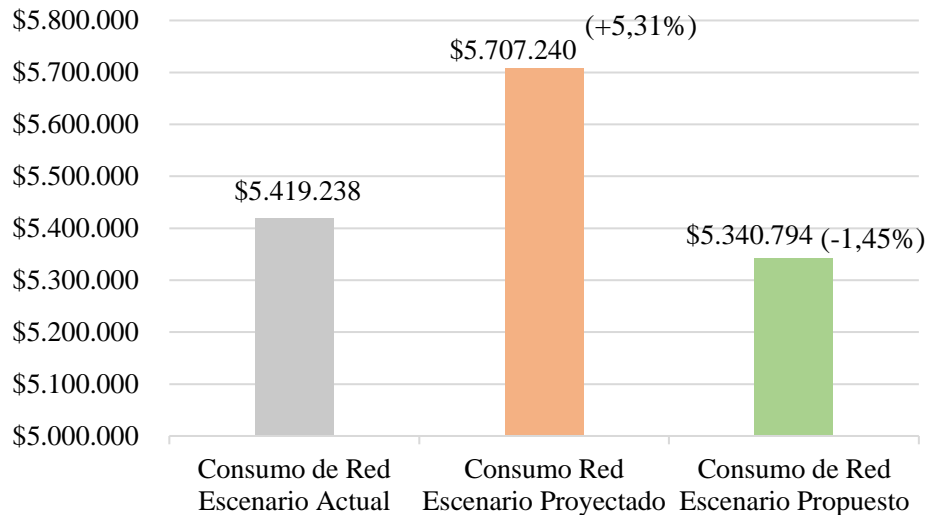
En las siguientes líneas se estudia el escenario propuesto, el cual incluye una aislación de muros exteriores con sistema EIFS, un trabajo de aislación con lana mineral en el muro de terciado de la elevación sur del módulo 1 y la instalación de paneles fotovoltaicos de 3 kW de potencia. Para este estudio final, se considerará el contexto del colegio completo, aproximando de esta manera los efectos que los sistemas de aislación exterior representan tanto en reducción de consumo, como también en aumento de demanda eléctrica y costos. La tabla XIII y XIV del anexo muestra en detalle dicho cálculos.

De esta manera, recopilando toda la información anteriormente presentada, se han podido obtener los valores finales de la propuesta de mejora para el Colegio Plazuela. En la tabla 14, se puede observar los valores totales de demanda, generación eléctrica, desglose de su uso y ahorros y beneficios totales.

Variable	Unidad	Valor
Demanda general Colegio	[kWh/año]	19.890
Demanda Calefacción Colegio	[kWh/año]	1.588
Generación	[kWh/año]	4.356
Uso energía en calefacción	[kWh/año]	219
Uso energía en consumo general	[kWh/año]	2.229
Excedente	[kWh/año]	1.908
Consumo Red	[kWh/año]	19.030
Ahorro consumo de Red	[kWh/año]	2.449
Ahorro consumo de Red	[\$/año]	\$ 263.703
Venta de energía excedente	[\$/año]	\$ 102.743

**Tabla 13:** *Datos totales agregados para el Escenario Propuesto, considerando el colegio completo.*

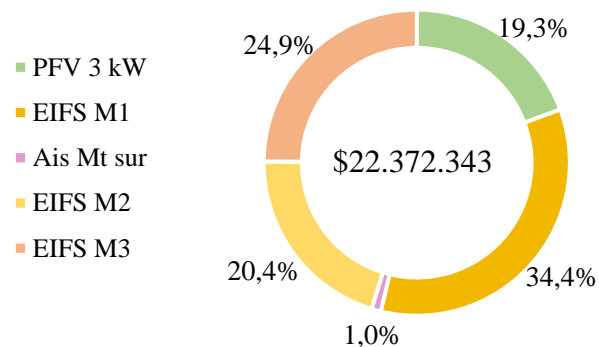
De la información anterior se desprende que el beneficio anual de esta propuesta asciende a \$366.446. Esta reducción de costos permite que el escenario propuesto, sea el que anualmente gaste menos recursos por conceptos de electricidad.



**Gráfico 19:** *Gastos por conceptos de suministro eléctrico aportados por la empresa distribuidora CGE, para cada uno de los escenarios estudiados.*

De esta manera, tanto los paneles fotovoltaicos como los trabajos de aislación térmica propuestos, permiten que el Colegio Plazuela pueda satisfacer sus necesidades energéticas, las cuales se ven incrementadas debido al sistema de calefacción que se proyecta adquirir, con gastos que son menores incluso a los del escenario actual.

En cuando a la inversión requerida, ésta asciende a un monto de \$22.372.343, cuya composición se puede observar en el gráfico 20.



**Gráfico 20:** *Desglose de la inversión por cada obra propuesta*

Considerando como tasa de descuento una tasa de inflación de 3% anual (Banco Central de Chile), se calcula el valor actual neto (VAN) de la solución propuesta, la cual arroja un valor de -\$15.991.364, lo cual es considerado un proyecto no rentable económicamente. Esto, considerando un horizonte de evaluación de 25 años, debido a que la vida útil de los paneles fotovoltaicos tiene dicho periodo estimado (Euskenerg, 2020).

Pese al valor obtenido del VAN, es importante destacar que el financiamiento necesario para llevar a cabo la propuesta presentada debiese surgir desde fondos públicos destinados a mejorar el nivel energético de los establecimientos educacionales. Esto debido a que el Colegio Plazuela es de carácter municipal, lo que significa que no existe una figura de sostenedor privado que pueda financiar la inversión ni beneficiarse de los ahorros proyectados.

Además de los efectos energéticos presentados, la apuesta de instalar paneles fotovoltaicos trae consigo un movimiento de concientización de toda la comunidad escolar sobre las energías renovables y el importante rol que este tipo de energías jugará en un futuro cercano. Del mismo modo, su instalación puede ser el motor de potenciales nuevos proyectos energéticos en la comuna, lo cual además de lograr ahorros económicos importantes, representa un aporte al cuidado del medioambiente.

## 6. | CONCLUSIONES

Habiendo estudiado detalladamente los tres escenarios planteados en un inicio, es posible realizar afirmaciones robustas respecto al Colegio Plazuela y su proyecto de conservación.

En primer lugar, se puede afirmar que el proyecto, cuyos recursos son otorgados por el Ministerio de Educación a través de la Dirección de Educación Pública, si permite alcanzar un confort térmico en sus salas de clases, lo que se traduce en la práctica en tener un sistema de calefacción con una potencia tal que sea capaz de garantizar una temperatura mínima de 20°C, prácticamente a toda hora de la jornada escolar para todos los meses del año. Para lo cual, se requiere de un funcionamiento a máxima capacidad de los equipos de calefacción durante las primeras horas del día, especialmente en los meses de invierno.

Por otro lado, la demanda eléctrica requerida para calefaccionar el módulo 1 del colegio es de 1.161 [kWh/año] y de 2.674 [kWh/año] para el establecimiento completo, considerándose los módulos 1, 2 y 3.

Dicha demanda es comprendida como adicional al consumo histórico del colegio, debido a que previo al proyecto de conservación, el colegio Plazuela cuenta con un sistema de calefacción compuesto por estufas a gas, sin requerir suministro eléctrico para abastecer dicho sistema. Este aumento de demanda, implican un alza de 5,31% sobre el total de gasto anual estimado del establecimiento por conceptos de electricidad proveniente de la compañía de distribución local CGE.

Si bien el primer objetivo presenta resultados positivos debido a que el proyecto logra un confort térmico, el colegio cuenta con importantes oportunidades de mejora a nivel de eficiencia energética. Dejando de lado la restricción presupuestaria, la solución constructiva

que más beneficios conlleva es la aislación del piso de las salas de clases, ya que, a través de éste, se pierde cerca del 41% del total de calor perdido por la envolvente. Aun sin considerar costos, otra alternativa muy recomendable de ejecutar es el recambio de ventanas, instalando superficies vidriadas con termopanel, ya que, de todos los elementos constructivos que componen la envolvente, los que tiene mayor transmitancia térmica son justamente los vidrios que componen las ventanas, con un valor de 5,7 [W/m<sup>2</sup>°C]. Esto quiere decir que éstas representan la superficie donde el calor escapa con mayor facilidad.

Sin embargo, al considerar los costos de cada una de las soluciones de aislación propuesta, se determina que la opción más eficiente, es decir, con la que es más barato reducir una unidad de energía anual, es con la instalación de sistemas de aislación exterior EIFS. Si se tuviese que elegir solo una elevación para su instalación, se recomienda realizar esto en la elevación sur, esto debido a que ésta superficie prácticamente no recibe radiación solar, por lo que un sistema de aislación jugaría un rol únicamente de retención de calor, mas no un bloqueo a las ganancias solares. No obstante, dado el análisis económico y energético realizado, finalmente se recomienda la instalación de aislación EIFS en la totalidad de los muros de los tres módulos principales del establecimiento.

Por parte de los paneles fotovoltaicos, estos representan la alternativa de mejores beneficios económicos, ya que además de reducir de forma significativa el consumo de suministro eléctrico por parte de la compañía distribuidora, también consideran la venta de una cantidad importante de excedentes de energía, la cual se traduce en un descuento adicional a las cuentas mensuales de electricidad. Para efectos de esta memoria, y con la finalidad de compensar el aumento energético relacionado a la instalación del sistema de calefacción, se propone la instalación de un conjunto de paneles de capacidad agregada de 3 kW. Pese a lo anterior, se sugiere estudiar a futuro alternativas de mayor potencia, debido a

los beneficios y la importante brecha que aún existe entre la demanda eléctrica del establecimiento y la potencial energía generada que efectivamente es consumida por el colegio.

De esta manera, la solución propuesta para aumentar la eficiencia energética del colegio está compuesta por tres obras principales. Por una parte, la ya mencionada instalación de paneles solares. Por otra parte, la instalación de sistemas de aislación exterior EIFS en cada uno de los muros de los tres módulos principales del establecimiento. Y también el trabajo de aislación en el muro de terciado de orientación sur del módulo 1, dando un mejor uso al material aislante disponible (lana mineral), cuya adquisición ya está considerado por el proyecto de conservación.

Estas propuestas, implican una inversión de \$22.372.343, de los cuales cerca del 20% corresponden a la partida de paneles fotovoltaicos, mientras que el resto corresponde a las obras de aislación térmica antes mencionadas. En contraparte, las tres propuestas en mejora, en conjunto, generan como beneficio un ahorro anual de \$366.446, representando una reducción de 1,45% del costo con respecto al escenario actual del colegio (aun sin la realización del proyecto) y a una disminución de 6,42% con respecto al escenario proyectado, logrando llegar a un valor del gasto anual estimado de electricidad de \$5.340.794.

Es importante destacar que, si bien la inversión de los sistemas de aislación representa cerca del 80% del total de recursos necesarios, significa al mismo tiempo una reducción importante de la energía demandada para calefaccionar el establecimiento. Esto representa un beneficio relevante ante eventuales cortes temporales de suministro eléctrico, debido a que permite gestionar de forma más eficiente los pocos recursos energéticos que se tendrían disponibles ante dicha eventualidad. Esto, considerando que los paneles fotovoltaicos aportan

de forma marginal a cubrir los requerimientos energéticos de la calefacción, debido a un desfase horario entre la demanda máxima y la electricidad generada.

En cuanto a los indicadores económicos, el proyecto de inversión para el escenario propuesto, presenta un VAN negativo de -\$15.991.364. Si bien dentro de los objetivos de la presente memoria no se busca proponer una alternativa necesariamente rentable económicamente, si se menciona que, en caso de querer mejorar la rentabilidad de la inversión señalada, una buena manera es incrementar la potencia de los paneles fotovoltaicos instalados, logrando así aumentar de forma importante los beneficios.

Más allá de los resultados económicos, existen beneficios sociales y medioambientales muy notables a destacar, tanto para el escenario proyectado como también para el propuesto.

Para el primer escenario, el proyecto de conservación permite avanzar desde un panorama de pobreza energética a un sistema de calefacción con potencia tal que permite alcanzar un confort térmico en sus aulas. Esto trae consigo beneficios en todo ámbito. Por una parte, se mejora considerablemente el espacio físico en el cual se desenvuelven los estudiantes durante sus procesos de aprendizaje, minimizando las distracciones ambientales para lograr mejores niveles de concentración, como también del rendimiento académico. Se sugiere al Colegio Plazuela establecer parámetros de medición, tanto cuantitativos, como por ejemplo calificaciones, niveles de asistencia, participación en clases, como también cualitativos, como podrían ser encuestas a estudiantes y docentes, análisis de la calidad del clima escolar, entre otras, para lograr cuantificar las mejoras a nivel educacional que traerá consigo la realización del proyecto de conservación.

Por otra parte, los beneficios en salud también son muy destacables. El proyecto de conservación permite esperar una reducción en las enfermedades relacionadas con la

exposición al frío y la humedad, favoreciendo tanto a estudiantes como también a docentes, administrativos y a toda la comunidad en general. En la misma línea de lo anterior, se sugiere al colegio definir parámetros que permitan medir cuantitativamente estos efectos, como por ejemplo tasa de ausentismo escolar o licencias médicas de docentes y administrativos y colaboradores en general del establecimiento.

Otro aspecto muy positivo del escenario proyectado para beneficiar la salud de la comunidad educativa radica en la reducción de emisiones de gases intradomiciliarios, al pasar de un sistema de calefacción a gas a uno eléctrico. Lo cual, además, significa un ahorro importante para las familias de la comunidad educativa, ya que, hasta el momento, los costos asociados a la climatización de las salas eran financiada en un 100% por los apoderados, costo que se transfiere a la cuenta eléctrica del colegio con el nuevo sistema.

Mientras que, en el escenario proyectado, la inclusión de fuentes de energía renovable y trabajos asociados a la eficiencia energética y la gestión óptima de los recursos disponibles, permite disminuir la dependencia que el sistema de calefacción tiene con el suministro eléctrico de la red local, lo cual permite avanzar de forma importante para poder garantizar el confort térmico, reduciendo el riesgo que se tiene al depender únicamente de un sistema de abastecimiento de energía. De forma complementaria, los trabajos propuestos para incrementar la eficiencia energética permiten crear conciencia entre los miembros de la comunidad sobre el cuidado del medioambiente y dando la posibilidad a despertar interés en la comuna por proyectos de energías limpias, tanto para alcanzar beneficios económicos, como también para aportar de forma local a combatir la crisis global del cambio climático.

## 7. | ANEXOS

**Tabla I:** Lista de materiales que componen la envolvente del módulo 1 del Colegio Plazuela

Material	Elevación	Espesor $\epsilon$ [m]	Conductividad térmica $\lambda$ [W/M <sup>o</sup> K]	R [m <sup>2</sup> °K/W]
Estuco (Mortero de Cemento)	N, S, O, P	0,030	1,400	0,021
Mortero de Cemento (Yaga y Tendel)	N, S, O, P	0,140	1,400	0,100
Ladrillo Fiscal (28,5x14x4,5cm)	N, S, O, P	0,140	0,500	0,280
Hormigón Cadena	N, S, O, P	0,200	1,630	0,123
Ventana	N, S, O	0,006	1,200	0,005
Puerta	S	0,045	0,104	0,433
Panel Ranurado 9mm	S,O	0,009	0,104	0,087
Panel Ranurado	C	0,009	0,112	0,080
Cámara aire	S,O	0,100		0,165
Zinc (cubierta curva)	C	0,000	123	0,000
Papel Fieltro 30 Lbs	C	0,000	0,130	0,003
Panel OSB	C	0,010	0,095	0,105
Aislación lana mineral	C	0,080	0,038	2,133
Ripio	Piso	0,200	1,400	0,143
Radier (Hormigón)	Piso	0,100	1,630	0,061
Cerámica sing Cordillera 60x60	Piso	0,008	1,750	0,005
Rsi	Piso			0,170
Rsi	C			0,090
Rsi	N, S, O, P			0,120
Rse	P			0,120
Rse	N, S, O, C, Piso			0,050

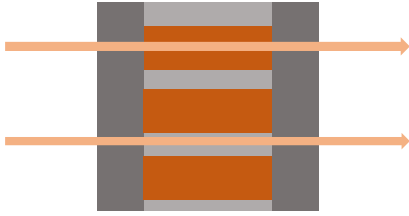
**Tabla I:** *Materiales que componen la envolvente del módulo 1 del Colegio Plazuela. Segunda columna muestra en qué elevación - ya sea Norte (N), Sur (S), Oriente (O), Poniente (P), Cubierta (C) o Piso (Pi) - se emplea el elemento descrito. También se muestran las resistencias superficiales usadas, siguiendo lo indicado por la Nch 853 Of.2007*

**Tabla II:** Detalle de los elementos que componen cada una de las elevaciones de la envolvente del módulo 1

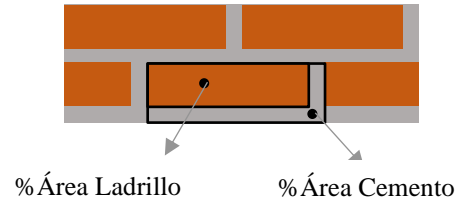
Elevación/Vista	Estructura	Área [m <sup>2</sup> ]	T.T [W/m <sup>2</sup> °C]	Total [W/°C]
Elevación Norte	Muro Ladrillo	67,73	2,36	160,2
	Muro Cadena	15,22	3,42	52,0
	Ventana	47,52	5,71	271,5
Elevación Sur	Muro Ladrillo	62,80	2,36	148,5
	Muro Cadena	15,22	3,42	52,0
	Ventana	15,84	5,71	90,5
	Puertas	21,39	1,64	35,1
	Muro Terciado	15,22	1,97	30,0
Elevación Oriente	Muro Ladrillo	10,76	2,36	25,4
	Muro Cadena	2,24	3,42	7,7
	Ventana	3,96	5,71	22,6
	Muro Terciado	7,28	1,97	14,3
Elevación Poniente	Muro Ladrillo	21,42	2,02	43,2
	Muro Cadena	2,24	2,76	6,2
Cubiertas	Estructura completa	310,25	0,41	126,0
Piso	Estructura completa	260,94	2,33	608,6
	Transmitancia línea: 1,4 [W/m <sup>2</sup> °C] y Perímetro 98,18 [m]			137,4
Total				2287,7

**Tabla II:** *Detalle de los elementos que componen cada una de las elevaciones de la envolvente del módulo 1, con los valores particulares tanto de área como también de transmitancia térmica.*

Para el cálculo del valor de la transmitancia térmica  $U$  del muro de ladrillo, se debió tener en cuenta su carácter de no homogéneo. Esto debido a que, si se analiza la sección transversal del muro, se puede ver que existen espacios donde el calor debe atravesar el ladrillo, y por otros en los que atraviesa a través de los espacios denominados yaga y tendel, los cuales representan el cemento que une los ladrillos, tal como se puede apreciar a continuación en la figura I. Y, en términos de área, se emplea en el cálculo el porcentaje de muro que representa tanto los ladrillos como el cemento entre ellos, tal como se muestra en la figura II.



**Figura I:** Sección transversal del muro de ladrillo.



**Figura II:** Determinación del porcentaje de muro que representan tanto los ladrillos como el cemento.

Lo anterior origina una forma levemente diferente a la presentada en el punto 5.1.1.

De esta forma, se debe considerar que la siguiente fórmula:

$$U_{\text{muro de ladrillo}} = U_{\text{ladrillo}} * \% \text{Área}_{\text{ladrillo}} + U_{\text{cemento}} * \% \text{Área}_{\text{cemento}} \quad (\text{I})$$

Es importante destacar que tanto el valor  $U_{\text{ladrillo}}$  como también  $U_{\text{cemento}}$  ya consideran el efecto de transmitancia térmica provocado por el estuco (capa de cemento que cubre la parte frontal de los ladrillos) tanto en su cara interna como también externa. De esta manera, se han podido realizar los cálculos, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Variable	Unidad	Valor	%
Área Ladrillo	$[m^2]$	0,013	71,3
Área Cemento	$[m^2]$	0,005	28,8
U Estuco-Ladrillo-Estuco.	$[W/(m^2 \cdot C)]$	1,777	
U Estuco-Cemento-Estuco.	$[W/(m^2 \cdot C)]$	2,612	
U Muro Ladrillo	$[W/(m^2 \cdot C)]$	2,017	

**Tabla III:** Detalle de los valores que permiten calcular el valor de la transmitancia térmica ( $U$ ) para el muro de ladrillo de carácter heterogéneo.

La siguiente tabla muestra el detalle de las ganancias solares obtenidas por cada hora de la jornada escolar, por cada mes del año:

Mes/Horario	Ganancia solar/ hora/mes [kW]							
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
Enero	4,42	6,94	9,06	10,69	11,80	12,14	11,71	10,55
Febrero	4,69	8,25	11,35	13,78	15,34	16,04	15,54	13,86
Marzo	4,72	8,39	12,40	15,39	17,35	17,96	17,13	14,97
Abril	3,46	7,22	11,24	14,17	16,02	16,08	15,42	13,10
Mayo	1,63	5,11	8,58	11,14	13,44	14,12	12,90	10,01
Junio	0,32	5,78	7,78	10,64	12,60	13,77	12,70	10,06
Julio	0,39	4,92	7,40	10,00	12,10	12,60	11,62	9,34
Agosto	2,16	5,33	8,20	10,72	12,71	12,79	12,05	9,95
Septiembre	4,28	7,24	9,92	12,39	13,66	13,86	12,71	10,82
Octubre	4,51	7,61	10,09	11,98	12,85	12,53	11,71	10,03
Noviembre	4,74	7,04	8,92	10,12	11,01	11,07	10,23	8,88
Diciembre	2,85	4,24	5,46	6,18	6,84	6,87	6,55	5,82

**Tabla IV:** *Tabla que muestra el total de las ganancias solares recibidas tanto por los muros y cubiertas como también por las ventanas en las que incide la radiación solar.*

A continuación, se presenta el detalle de las temperaturas externas clasificadas por hora y por mes.

Mes/Horario	8:15 -	9:00 -	10:00 -	11:00 -	12:00 -	13:00 -	14:00 -	15:00 -
	8:59	9:59	10:59	11:59	12:59	13:59	14:59	15:18
Enero	15,0	17,6	20,3	23,0	24,2	25,6	26,9	27,1
Febrero	15,6	18,2	20,9	23,5	24,6	26,0	27,2	27,4
Marzo	13,3	16,0	19,0	22,2	24,2	25,6	26,9	26,5
Abril	11,1	13,5	16,2	19,2	20,5	21,8	22,9	22,6
Mayo	8,8	10,8	13,2	15,7	17,2	18,5	19,4	19,3
Junio	7,5	9,1	11,2	13,6	14,5	15,6	16,5	16,2
Julio	6,0	7,6	9,6	12,0	13,5	14,7	15,6	15,3
Agosto	6,0	7,7	9,9	12,4	14,8	16,1	17,1	16,9
Septiembre	7,1	9,2	11,6	14,3	16,0	17,2	18,1	18,4
Octubre	9,3	11,4	13,9	16,7	18,0	19,3	20,3	20,4
Noviembre	11,9	14,2	16,8	19,6	21,4	22,8	24,0	24,0
Diciembre	13,6	16,1	18,7	21,3	23,2	24,5	25,7	26,0

**Tabla V:** *Datos obtenidos mediante la herramienta Explorador Solar de Ministerio de Energía. Se considera la temperatura promedio mensual durante rangos de una hora.*

Mes/Hora	Módulo 1							
	Matriz de demanda [kWh]							
	8:15 - 8:59	9:00 - 9:59	10:00 - 10:59	11:00 - 11:59	12:00 - 12:59	13:00 - 13:59	14:00 - 14:59	15:00 - 15:18
Enero	--	--	--	--	--	--	--	--
Febrero	--	--	--	--	--	--	--	--
Marzo	2,51	--	--	--	--	--	--	--
Abril	7,57	0,36	--	--	--	--	--	--
Mayo	13,16	9,15	--	--	--	--	--	--
Junio	16,69	12,81	5,58	--	--	--	--	--
Julio	19,45	17,45	9,78	1,21	--	--	--	--
Agosto	18,09	16,63	8,35	--	--	--	--	--
Septiembre	14,46	11,17	2,30	--	--	--	--	--
Octubre	10,15	5,13	--	--	--	--	--	--
Noviembre	5,12	--	--	--	--	--	--	--
Diciembre	3,39	--	--	--	--	--	--	--

**Tabla VI:** Matriz de demanda de energía en forma de calor (en kWh) para mantener temperatura mayor o igual a 20°C. Las celdas sin valor indican que la demanda de calefacción está cubierta por efecto de las ganancias internas y solares.

Mes	Demanda energía en forma de calor [kWh]		Demanda energía eléctrica [kWh]		Potencia mínima necesaria [kW]	
	Módulo 1	Colegio	Módulo 1	Colegio	Módulo 1	Colegio
Enero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Febrero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Marzo	55,1	129,1	16,2	38,0	3,3	7,82
Abril	166,6	407,4	49,0	119,8	10,1	22,70
Mayo	468,5	1090,0	137,8	320,6	17,5	39,05
Junio	771,7	1746,6	227,0	513,7	22,3	49,36
Julio	526,8	1197,8	154,9	352,3	25,9	57,57
Agosto	947,4	2180,5	278,7	641,3	24,1	53,74
Septiembre	558,4	1282,9	164,2	377,3	19,3	43,25
Octubre	321,0	735,8	94,4	216,4	13,5	30,49
Noviembre	107,5	268,3	31,6	78,9	6,8	15,58
Diciembre	23,7	53,6	7,0	15,8	4,5	10,21
<b>Total</b>	<b>3946,9</b>	<b>9092,1</b>	<b>1160,8</b>	<b>2674,1</b>	<b>25,9</b>	<b>57,57</b>

**Tabla VII:** Resumen que muestra de forma mensual y total la demanda energética, la demanda eléctrica y la potencia, tanto para el módulo 1 como también para el colegio completo. Se muestra en negrita los valores más elevados del año para cada variable

Variables	Unidad	Sin EIFS	EIFS 4 muros	EIFS Sur	EIFS Norte	EIFS Poniente	EIFS Oriente
U equivalente Norte	[W/m <sup>2</sup> °C]	2,56	0,84	2,56	0,84	2,56	2,56
U equivalente Sur	[W/m <sup>2</sup> °C]	2,47	0,83	0,83	2,47	2,47	2,47
U equiv. Oriente	[W/m <sup>2</sup> °C]	2,34	0,82	2,34	2,34	2,34	0,82
U equiv. Poniente	[W/m <sup>2</sup> °C]	2,09	0,79	2,09	2,09	0,79	2,09
QΔT Norte	[W/°C]	483,7	341,4	483,7	341,4	483,7	483,7
QΔT Sur	[W/°C]	356,0	203,2	203,2	356,0	356,0	356,0
QΔT Oriente	[W/°C]	70,1	39,2	70,1	70,1	70,1	39,2
QΔT Poniente	[W/°C]	49,4	18,6	49,4	49,4	18,6	49,4
QΔT Total	[W/°C]	1831,2	1474,4	1678,4	1688,9	1800,4	1800,4
Demanda energética	[kWh/año]	3947	2882	3401	3593	3834	3876
Potencia	[kW]	25,94	20,98	23,79	23,98	25,50	25,51
Demanda eléctrica	[kWh/año]	1161	848	1000	1057	1128	1140
Ahorro electricidad	[kWh/año]	-	313	161	104	33	21
Ahorro por m2	[kWh/año/m2]	-	1,42	1,72	1,26	1,40	1,02

**Tabla VIII:** Sistema de aislación E.I.F.S y sus efectos en distintos parámetros energéticos según cada uno de los muros o soluciones de implementación.

Mes	Sin EIFS	EIFS 4 muros	EIFS Sur	EIFS Norte	EIFS Oriente	EIFS Poniente
Enero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Febrero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Marzo	16,2	6,9	11,2	13,4	15,7	15,2
Abril	49,0	33,7	40,5	42,6	47,6	46,5
Mayo	137,8	103,3	121,2	125,9	135,1	134,5
Junio	227,0	169,3	198,2	208,5	222,4	221,2
Julio	154,9	116,9	134,6	142,6	152,0	150,8
Agosto	278,7	213,0	246,2	256,8	273,9	272,1
Septiembre	164,2	115,8	138,3	149,5	161,7	159,0
Octubre	94,4	64,5	78,7	84,4	93,3	91,2
Noviembre	31,6	20,2	25,9	27,3	31,4	30,5
Diciembre	7,0	3,8	5,5	5,6	7,0	6,7
Total	1160,8	847,5	1000,2	1056,7	1140,1	1127,7

**Tabla IX:** Consumo mensual de suministro eléctrico según cada una de las soluciones presentadas de aislación térmica exterior EIFS.

VARIABLES	UNIDAD	SIN DVH	DVH N, S y O	DVH N	DVH S	DVH O
Gs promedio (v) Norte	[kW]	5,20	4,60	4,60	5,20	5,20
Gs promedio (v) Oriente	[kW]	0,74	0,65	0,74	0,74	0,65
Gs promedio (v) Total	[kW]	5,94	5,25	5,34	5,94	5,86
Gs promedio (v+o) Total	[kW]	9,97	9,28	9,36	9,97	9,88
QΔT Norte	[W/°C]	483,7	360,7	360,7	483,7	483,7
QΔT Sur	[W/°C]	356,0	315,0	356,0	315,0	356,0
QΔT Oriente	[W/°C]	70,1	59,8	70,1	70,1	59,8
QΔT Poniente	[W/°C]	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4
QΔT Total	[W/°C]	1831,2	1656,9	1708,2	1790,2	1821,0
Demanda energética	[kWh/año]	3947	3466	3636	3797	3923
Potencia	[kW]	25,94	23,52	24,24	25,36	25,79
Demanda eléctrica	[kWh/año]	1161	1019	1069	1117	1154
Ahorro electricidad	[kWh/año]	0	141	91	44	7
Ahorro por m2	[kWh/año/m2]	-	2,10	1,93	2,79	1,78

**Tabla X:** Comportamiento de la demanda energética, pérdidas de calor por envolvente y ganancias solares por superficies vidriadas (v) y totales (v+o) en función de las distintas soluciones de DVH propuestas.

Mes	SIN DVH	DVH N, S y O	DVH N	DVH S	DVH O
Enero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Febrero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Marzo	16,2	12,2	13,7	14,9	16,1
Abril	49,0	40,8	43,3	45,7	48,5
Mayo	137,8	122,1	127,4	133,4	136,9
Junio	227,0	201,5	210,8	219,2	225,4
Julio	154,9	137,6	144,0	149,5	153,9
Agosto	278,7	249,2	259,5	269,9	277,1
Septiembre	164,2	143,4	151,3	157,3	163,4
Octubre	94,4	81,0	85,7	90,2	94,0
Noviembre	31,6	26,3	27,9	30,1	31,5
Diciembre	7,0	5,4	5,8	6,6	7,0
Total	1160,8	1019,5	1069,4	1116,7	1153,8

**Tabla XI:** Consumo mensual de suministro eléctrico según cada una de las soluciones presentadas de ventanas con termopanel (DVH).

Mes	Consumo CGE	PFV de 1,5 kW Generación				PFV de 3,0 kW Generación				
		Total	Calefacción M1	Uso general	No usada	Consumo CGE	Total	Calefacción M1	Uso general	No usada
Enero	141	236	0	114	123	132	472	0	123	349
Febrero	105	209	0	86	123	100	417	0	91	326
Marzo	922	219	5	163	51	790	439	11	289	139
Abril	1.561	176	7	134	35	1.455	352	12	235	105
Mayo	1.768	134	7	103	24	1.686	269	15	177	77
Junio	2.664	121	18	85	19	2.584	243	35	146	61
Julio	2.769	129	12	75	41	2.726	258	21	110	127
Agosto	2.896	148	21	102	25	2.805	296	42	171	82
Septiembre	2.545	172	27	111	34	2.444	344	43	195	106
Octubre	1.647	192	17	135	40	1.531	384	34	233	117
Noviembre	1.351	211	8	158	45	1.220	421	15	281	125
Diciembre	1.179	231	2	115	114	1.128	462	5	163	294
Total	19.547	2.178	125	1.379	675	18.602	4.356	232	2.216	1.908

**Tabla XII:** *Detalle de la distribución mensual de uso para la energía solar generada y el respectivo consumo mensual requerido de la red de distribución local.*

Mes	Consumo eléctrico sin EIFS				Consumo eléctrico con EIFS			
	M1	M2	M3	Total	M1*	M2	M3	Total
Enero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Febrero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Marzo	16,2	4,5	17,2	38,0	6,7	0,0	6,0	12,7
Abril	49,0	24,1	46,7	119,8	33,4	8,0	19,4	60,8
Mayo	137,8	74,7	108,1	320,6	102,5	32,1	57,7	192,3
Junio	227,0	124,0	162,7	513,7	167,9	55,8	94,8	318,5
Julio	154,9	85,9	111,5	352,3	116,1	43,7	64,5	224,3
Agosto	278,7	157,4	205,3	641,3	211,5	75,1	117,0	403,5
Septiembre	164,2	87,3	125,7	377,3	114,6	38,1	67,1	219,8
Octubre	94,4	48,0	74,0	216,4	63,7	15,1	38,2	117,1
Noviembre	31,6	14,6	32,6	78,9	19,9	0,2	12,6	32,7
Diciembre	7,0	2,5	6,3	15,8	3,7	0,0	2,7	6,4
Total	1.1601	623	890	2.674	840	268	480	1.588

**Tabla XIII:** Consumo eléctrico de cada módulo del colegio, tanto para escenarios con y sin sistema de aislación exterior EIFS. (\*) Columna de M1 con EIFS también considera la instalación de material aislante en el muro de terciado sur.

Módulo con EIFS	Inversión
Módulo 1*	\$ 7.924.438
Módulo 2	\$ 4.556.080
Módulo 3	\$ 5.562.925
Total	\$ 18.043.443

**Tabla XIV:** Inversión necesaria para aislar con sistema EIFS cada módulo. \*Módulo 1 considera obra de aislación en muro de terciado de elevación sur

## 8. | REFERENCIAS

- ACESOL. (2019). *Guía para usuarios del Net Billing*. Obtenido de <https://acesol.cl/info-tecnica/gu%C3%ADa-para-usuarios-del-net-billing.html>
- Álvarez, B., & Boso, Á. (agosto de 2018). *Representaciones sociales de la contaminación del aire y las estufas de leña en diferentes niveles socioeconómicos de la ciudad de Temuco, Chile*. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992018000300527&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992018000300527&script=sci_arttext)
- Amigo, C., Araya, P., Billi, M., Calvo, R., Oyarzún, T., & Urquiza, A. (agosto de 2018). *Políticas públicas y pobreza energética en Chile: ¿una relación fragmentada?* Obtenido de <http://redesvid.uchile.cl/pobreza-energetica/wp-content/uploads/2018/10/Pol%C3%ADticas-p%C3%ABlicas-y-pobreza-energ%C3%A9tica-en-Chile-FINAL-con-ISBN-1.pdf>
- Banco Central de Chile. (s.f.). *¿Por qué la inflación es importante?* Obtenido de <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/areas/politica-monetaria#:~:text=%C2%BFPor%20qu%C3%A9%20la%20meta%20de,lograr%20un%20mayor%20crecimiento%20econ%C3%B3mico>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (4 de octubre de 2016). Obtenido de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2016/10/la-importancia-de-tener-una-buena-infraestructura-escolar/>
- Barreda, S. (2012). Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1627/Barreda%20G%C3%B3mez,%20Mar%C3%ADa%20Soledad.pdf?sequence=1>
- Barreda, S. (2012). *El Docente como gestor del clima del Aula. Factores a tener en cuenta*. Santander. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1627/Barreda%20G%C3%B3mez,%20Mar%C3%ADa%20Soledad.pdf?sequence=1>
- BCN. (2019). *Ley 21.040 Crea el Sistema de Educación pública*. Obtenido de <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1111237>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (25 de mayo de 2011). *www.leychile.cl*. Obtenido de [Modifica Decreto N°548, de 1998: https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025739](https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1025739)
- Blender, M. (10 de marzo de 2015). *Arquitectura & Energía*. Obtenido de <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- Burton, A. (4 de julio de 2011). *Salud infantil. Las emisiones del fuego de carbón frenan el crecimiento de los niños*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/106/10620241013.pdf>
- Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (abril de 2009). *Guía de Diseño para la eficiencia Energética en la Vivienda Social*. Obtenido de [http://old.acee.cl/576/articulos-61341\\_doc\\_pdf.pdf](http://old.acee.cl/576/articulos-61341_doc_pdf.pdf)

- Cabrera, M., & Risso, T. (12 de junio de 2018). *biobiochile.cl*. Obtenido de "Coelgio iglú": alumnos reclaman por estudiar con temperaturas al borde de los cero grados: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2018/06/12/colegio-iglu-alumnos-reclaman-por-estudiar-con-temperaturas-al-borde-de-los-cero-grados.shtml>
- Centro de estudios Mineduc. (2019). *Estadísticas de la Educación 2018*. Obtenido de <https://centroestudios.mineduc.cl/wp-content/uploads/sites/100/2019/11/ANUARIO-2018-PDF-WEB-FINALr.pdf>
- Chávez, F. (mayo de 2002). *Zona Variable de Confort Térmico*. Obtenido de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6104#page=3>
- CNE. (marzo de 2019). *Informe de Costos de Tecnologías de Generación*. Obtenido de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/03/Res.-Ext.-N%C2%B0-207-Informe-costos-de-generaci%C3%B3n-2019.pdf>
- CNE. (mayo de 2020). *Reporte mensual Sector Energético vol N°63*. Obtenido de [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/05/RMensual\\_v202005.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/05/RMensual_v202005.pdf)
- CNN. (25 de febrero de 2020). *CNN Chile*. Obtenido de [https://www.cnnchile.com/pais/50-colegios-liceos-mejor-puntaje-psu-2020\\_20200225/](https://www.cnnchile.com/pais/50-colegios-liceos-mejor-puntaje-psu-2020_20200225/)
- Colonelli, P., Guevara, J., Blender, M., & Yañez, P. (2015). *Manual Acondicionamiento térmico, criterios de intervención*. Santiago. Obtenido de [https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Manual\\_WEB.PDF](https://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Manual_WEB.PDF)
- Comisión Nacional de Energía. (junio de 2019). *Reporte mensual ERNC*. Obtenido de [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/06/RMensual\\_ERNC\\_v201906.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/06/RMensual_ERNC_v201906.pdf)
- Cossio, H., & Fajardo, M. (16 de enero de 2017). *Valhalla, el proyecto científico-sustentable que pondría a Chile en la cima de las energías limpias del mundo*. Obtenido de [elmostrador.cl](http://elmostrador.cl): <https://www.elmostrador.cl/cultura/2017/01/16/valhalla-el-proyecto-cientifico-sustentable-que-pondria-a-chile-en-la-cima-de-la-energias-limpias-del-mundo/>
- Diario oficial. (22 de marzo de 2012). *Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales*. Obtenido de [https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2017/08/ley\\_20571.pdf](https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2017/08/ley_20571.pdf)
- Díaz, C. (24 de abril de 2019). *El triste abandono de una escuela en Frutillar: los alumnos deben llevar frazadas por el frío*. Obtenido de Bio Bio Chile: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-los-lagos/2019/04/24/el-triste-abandono-de-una-escuela-en-los-lagos-los-alumnos-deben-llevar-frazadas-por-el-frio.shtml>
- Díaz, S., & Carrasco, J. (2018). *Estudio y Diseño de sistema de Calefacción domiciliario*. Obtenido de <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/42444/3560901544206UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Durán, S. (2019). *Contaminación atmosférica y consumo de leña en Valdivia. 2004-2018*. Obtenido de

- <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169886/Contaminacion-atmosferica-y-consumo-de-leña-en-Valdivia.pdf?sequence=1>
- Elige educar. (7 de junio de 2018). Obtenido de Pasar frío en salas de clases afecta el aprendizaje: [https://eligeeducar.cl/pasar-frio-salas-clases-afecta-aprendizaje-2?\\_\\_cf\\_chl\\_jschl\\_tk\\_\\_=b95c41b197d58e829d75c5f980a72bdfd0fb6924-1585960529-0-AWou9QeQgY4bUSb8cGww0FfBPxBXOjvQD9TLjQiMvGmv-1sg6RVGIIdTYUO2RMVv4Z05pSdldxb0q1pOpHx8WD-7cOJW8juOWRV-13t\\_K6Yp37Q5h5](https://eligeeducar.cl/pasar-frio-salas-clases-afecta-aprendizaje-2?__cf_chl_jschl_tk__=b95c41b197d58e829d75c5f980a72bdfd0fb6924-1585960529-0-AWou9QeQgY4bUSb8cGww0FfBPxBXOjvQD9TLjQiMvGmv-1sg6RVGIIdTYUO2RMVv4Z05pSdldxb0q1pOpHx8WD-7cOJW8juOWRV-13t_K6Yp37Q5h5)
- Energía Abierta. (23 de noviembre de 2018). *energiaabierta.cl*. Obtenido de <http://energiaabierta.cl/catalogo/electricidad/>
- Euskenergy. (29 de enero de 2020). *cuál es la vida útil de los paneles solares*. Obtenido de <https://euskenergy.com/cual-es-la-vida-util-de-los-paneles-solares/#:~:text=La%20norma%20general%20indica%20que,degradaci%C3%B3n%20de%20sus%20c%C3%A9lulas%20fotovoltaicas>.
- Fariña, L. (12 de julio de 2019). *uchile.cl*. Obtenido de Liceo de Coyhaique será calefaccionado con energía de la tierra: <http://www.uchile.cl/noticias/155696/liceo-de-coyhaique-sera-calefaccionado-con-energia-de-la-tierra>
- Flores, T. (s.f.). *politicapublica.cl*. Obtenido de <https://politicapublica.cl/definicion-de-politica-publica/>
- Franco, J. T. (21 de junio de 2018). *Plataforma Arquitectura*. Obtenido de ¿Qué es EIFS o cómo diseñar un sistema de aislación térmica exterior?: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/893327/que-es-eifs-o-como-disenar-un-sistema-de-aislacion-termica-exterior>
- García, G., & Fuentes, J. (23 de marzo de 2018). *Relación del aumento de la temperatura ambiente y los cambios en la conducta de niños en etapa escolar diagnosticados con Trastorno por déficit de Atención e Hiperactividad*. Obtenido de <https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECA%20VIRTUAL/TESIS/07/MED/0002891-ADTESGR.pdf>
- Gobierno de Chile. (diciembre de 2015). *Política de uso de leña y sus derivados para la calefacción*. Obtenido de [http://www.minenergia.cl/archivos\\_bajar/2016/03/politica\\_leña\\_2016\\_web.pdf](http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/2016/03/politica_leña_2016_web.pdf)
- Gobierno de Chile. (9 de abril de 2020). *Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) de Chile*. Obtenido de [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC\\_Chile\\_2020\\_espan%CC%83ol-1.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf)
- Gómez, P., García, A., & Alonso, P. (1991). Obtenido de <https://previa.uclm.es/profesorado/dverastegui/DOCUMENTOS/ambiente.PDF>
- Haverinen-Shaughnessy, U., & Shaughnessy, R. (2015). Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Student's Test Scores. *PLoS ONE*. Obtenido de <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0136165>

- Ibarra, M., & Mora, R. (mayo de 2011). *Habitar la escuela: El problema de la infraestructura y su relación con las enfermedades escolares en Chile*. Obtenido de doi: 10.4067/S0718-83582011000100005
- INEN. (2014). *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local*. Obtenido de [https://www.academia.edu/33574471/NTE\\_INEN\\_ISO\\_7730\\_unidov\\_AMBIENTE\\_TERMICO](https://www.academia.edu/33574471/NTE_INEN_ISO_7730_unidov_AMBIENTE_TERMICO)
- Irarrázaval, C. (2019). *Inecuación ERNC: Análisis costo-beneficio de las energías renovables no convencionales y de las políticas públicas para su promoción*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168068>
- Jimenez, D., & Vera, R. (febrero de 2015). *Influencia del factor ambiental en l calidad del rendimiento escolar*. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/27671/1/BFILO-PMP-15P05.pdf>
- Mejía, J. M. (2013). *Mantener la atención del estudiante en clase: un desafío del Docente*. Bucaramanga. Obtenido de <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/27563/1/147541.pdf>
- Mineduc. (s.f.). *Portal de Atención Ciudadana del Ministerio de Educación del Gobierno de Chile*. Obtenido de Subvención destinada a los alumnos: <https://www.ayudamineduc.cl/ficha/subvenciones-destinadas-los-alumnos-4>
- Ministerio de Educación. (1988). Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=14166&idParte=0>
- Ministerio de Educación. (11 de octubre de 2019). *mineduc.cl*. Obtenido de <https://www.mineduc.cl/fondo-de-infraestructura-2020/>
- Ministerio de Energía. (2018). *Ruta Energética 2018-2022*. Obtenido de <http://www.energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Política Energética 2050*. Obtenido de [http://www.minenergia.cl/archivos\\_bajar/LIBRO-ENERGIA-2050-WEB.pdf](http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/LIBRO-ENERGIA-2050-WEB.pdf)
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (13 de junio de 2020). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones*. Obtenido de <https://www.minvu.cl/wp-content/uploads/2019/05/OGUC-Junio-2020-D.S.-N%C2%B032-D.O.-13-06-2020.pdf>
- Molina, C., & Veas, L. (agosto de 2012). *Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno*. Obtenido de doi: 10.4067/S0718-915X2012000200004
- Molina, T. (24 de julio de 2018). *Emol.cl*. Obtenido de <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/07/24/914386/Infraestructura-deficiente-en-escuelas-Denuncias-crecen-un-41-en-comparacion-al-primer-semester-del-2017.html>
- Olguí, M. (7 de junio de 2018). *Elige Educar*. Obtenido de Pasar frío en salas de clases afecta el aprendizaje: <https://eligeeducar.cl/pasar-frio-salas-clases-afecta-aprendizaje-2>

- Perez, J., Montano, J., & Perez, J. (s.f.). *Healthy Schools*. Obtenido de Room temperature and its impact on student test scores: <https://healthyschools.cefpi.org/temperature.html>
- Perez, J., Montano, J., & Perez, J. (s.f.). Obtenido de <https://healthyschools.cefpi.org/temperature.html>
- Ramos, E. E. (7 de marzo de 2010). *Factores que intervienen en el aprendizaje*. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd7060.pdf>
- Rivas, E., Barrios, S., Dorner, A., & Osorio, X. (junio de 2008). *Fuentes de contaminación intradomiciliaria y enfermedad respiratoria en jardines infantiles y salas cuna de Temucoy Padre Las Casas, Chile*. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0034-98872008000600013&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0034-98872008000600013&script=sci_arttext&tlng=en)
- Saravia, G., Fuentes, G., & Lisset, J. (2018). *Relación del aumento de la temperatura ambiente y los cambios en la conducta de niños en etapa escolar diagnosticados con Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad*.
- Schueftan, A., & González, A. (26 de septiembre de 2014). *Calefacción en el sector residencial de Valdivia (Chile): Análisis de una encuesta de 2025 hogares*. Obtenido de <http://gvc.cl/wp-content/uploads/2017/01/Asades-2.pdf>
- Superintendencia de Educación. (30 de julio de 2018). Obtenido de [www.supereduc.cl](http://www.supereduc.cl): <https://www.supereduc.cl/wp-content/uploads/2018/07/Dict%C3%A1men-N%C2%B0-0045-1.pdf>
- Superintendencia de Educación. (2019). [www.supereduc.cl](http://www.supereduc.cl). Obtenido de Estudios y Estadísticas: <https://www.supereduc.cl/categoria-estudios-estadisticas/estadisticas/>
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles. (s.f.). *sec.cl*. Obtenido de Genera tu propia energía: [http://www.sec.cl/portal/page?\\_pageid=33,5819695&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,5819695&_dad=portal&_schema=PORTAL)
- Trebilcock Kelly, M., Muñoz, J. S., Martín, R. F., & Piderit-Moreno, B. (2017). Metodología para el diseño de edificios educacionales confortables y resilientes. *AUS [Arquitectura/Urbanismo/Sustentabilidad]*(20), 70-76. doi:10.4206/aus.2016.n20-11
- Unesco. (s.f.). *Tercer estudio regional comparativo y explicativo*. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Santiago/pdf/Chile-Ficha-Factores-Asociados.pdf>
- UNESCO. (s.f.). *Tercer Estudio Regional Comparativo y Explicativo*. Obtenido de <https://es.unesco.org/sites/default/files/chile-ficha-factores-asociados.pdf>