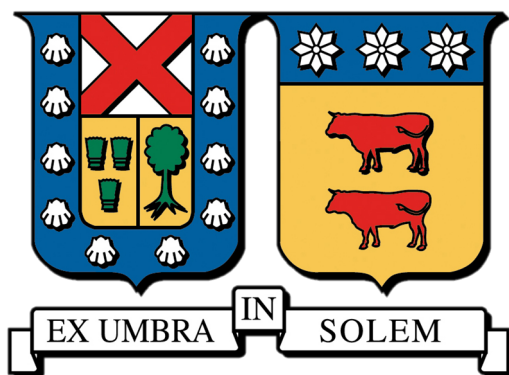




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**“PROPUESTA DE MEJORA EN LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA PARA EL CESFAM COYHAIQUE CON SAR
ADOSADO: EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y
ECONÓMICA”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL
INDUSTRIAL

AUTOR

SERGIO ANDRÉS CURGUÁN LÓPEZ

PROFESOR GUÍA

RODRIGO DEMARCO

PROFESOR CORREFERENTE:

FELIPE ESCUDERO

JULIO 2025, VALPARAÍSO



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Propuesta de mejora en la Eficiencia energética para el CESFAM Coyhaique con SAR Adosado: Evaluación de factibilidad Técnica y Económica

Nombre del candidato(a): Sergio Andrés Curguán López

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Demarco Bull, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Agradecimientos	5
2. Resumen Ejecutivo	6
3. Abstract	7
4. Problema de Investigación	8
4.0.1. Objetivo General	11
4.0.2. Objetivos Específicos	11
5. Marco Teórico	13
5.1. Transferencia de calor	13
5.1.1. Conducción	13
5.1.2. Convección	14
5.1.3. Radiación	15
5.2. Confort térmico	16
5.3. Resistencia térmica	19
5.4. Transmitancia térmica	20
5.5. Energías renovables y no renovables	21
5.6. Paneles fotovoltaicos	23
5.7. Gases de efecto invernadero	26
5.8. Eficiencia energética	27
5.9. Centros de Salud Familiar (CESFAM)	29
5.10. Normativa Técnica y Legal Aplicable al Proyecto CESFAM Coyhaique	30
5.10.1. Normativa general de edificación	30
5.10.2. Normas específicas por especialidad	31
5.10.3. Normas complementarias de construcción	32
5.10.4. Regulación institucional y sectorial	32
5.10.5. Requisitos Mínimos de Construcción	33
5.11. Simulación de Monte Carlo	34
6. Metodología	36
6.1. Enfoque del estudio	36

7. Herramienta de evaluación energética RETScreen	37
7.1. Objetivo del modelado en RETScreen	37
7.2. Estructura del modelado	38
7.3. Ventajas del uso de RETScreen	39
8. Ubicación geográfica y características generales	40
8.1. Temperatura del aire	42
8.2. Humedad Relativa	44
8.3. Radiación solar	44
8.4. Velocidad del Viento	46
8.5. Precipitación	47
9. Caso Base: Diseño Energético del CESFAM Coyhaique	48
9.1. Energía	48
9.1.1. Equipos de calentamiento	48
9.1.2. Equipos de enfriamiento	48
9.2. Envoltente del edificio	49
9.2.1. Paredes	49
9.2.2. Ventanas	50
9.2.3. Puertas	51
9.2.4. Techo	52
9.2.5. Piso	52
9.3. Ventilación	52
9.4. Luminarias	54
9.5. Equipos eléctricos	55
9.5.1. Equipos generales	55
9.5.2. Refrigeración	56
9.6. Agua caliente sanitaria	56
9.7. Bombas	57
9.8. Emisiones de gases de efecto invernadero	58
9.9. Análisis Caso Base	59
10.Caso Propuesto I: Implementación de Caldera de Biomasa y Paneles Fotovol- taicos	62
10.1. Cambio de caldera	62

10.2. Implementación de sistema fotovoltaico	64
10.3. Análisis Caso propuesto I	67
10.4. Comparación Resultados: Caso Base y Caso Propuesto I	69
10.4.1. Resultados Financieros	71
10.4.2. Análisis de Sensibilidad y Riesgo	73
11.Caso Propuesto II: Implmentación de caldera eléctrica y paneles fotovoltaicos	76
11.1. Cambio de Caldera	76
11.2. Implementación de sistema fotovoltaico	78
11.3. Análisis Caso propuesto II	78
11.4. Comparación Resultados: Caso Base y Caso Propuesto II	79
11.4.1. Resultados Financieros	81
11.4.2. Análisis de Sensibilidad y Riesgo	83
12.Análisis cambios en la Envolvente Térmica	86
13.Conclusiones y Recomendaciones	90
14.Anexos	97
14.1. Pantallazos RetScreen	100

1. Agradecimientos

Me costó, pero con el apoyo incondicional de la gente que confió en mí, más que yo mismo, doy gracias por estar ahí, a mis amigos que no pararon de ayudarme y decirme que me la podía, a la Javi, mi sicóloga, que me dijo que siempre estaba todo dentro de mi cabeza y que estaba oculto dentro de mi coraza de miedo. A mis hermanas que a su manera me esperaban en la cima porque siempre supieron que podía solo. Al Jordan que con su amor y cariño me enseñó a tenerme fé y que nada en este mundo es tan gigantesco como para dañarme. A la Macka que siempre estuvo conmigo presenciandome, queriendome y entendiendome mucho. A mi mamá que desde el primer momento confió en mí, sin siquiera saber que iba a estudiar, con sus lágrimas de orgullo y sus alientos para poder seguir, que fueron una de las armas más grandes para poder cuidarme y levantarme de mi cama. Con su frase célebre de "Nose que es lo que vas a estudiar, pero siempre te apoyaré en lo que hagas". Por último y no menos importante, a mí, por todas esas lágrimas que derramé solo y las veces que pensé que no podía, porque me digo ahora, ¡Si se pudo! ¡Siempre pude!, porque esta es una marca del inicio de un camino que recorreré gracias a toda la enseñanza que me ha dejado esta experiencia universitaria.

2. Resumen Ejecutivo

Este estudio presenta un análisis integral de eficiencia energética para el CESFAM Coyhaique, desarrollando dos propuestas de intervención que buscan reducir el consumo de energía convencional, los costos operacionales y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La primera propuesta contempla la sustitución de la caldera diésel por una caldera de biomasa a pellet, junto con la instalación de paneles fotovoltaicos que cubren el 50 % de la superficie del techo. La segunda propuesta considera el reemplazo del sistema de calefacción por calderas eléctricas, complementadas con un sistema fotovoltaico que cubre el 100 % de la cubierta disponible. Ambas alternativas presentan beneficios energéticos y ambientales relevantes. La opción con biomasa destaca por su alta rentabilidad, gracias al bajo costo del pellet, generando una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 97 %, un Valor Actual Neto (VAN) positivo y un periodo de recuperación de la inversión de solo 1,1 años. En contraste, la alternativa eléctrica ofrece una solución limpia y libre de combustibles fósiles, con una TIR del 7,4 % y un VAN negativo, aunque con un periodo de repago dentro del horizonte del proyecto (15 años), lo que la hace viable desde un enfoque público. Además, se realizó un análisis específico de la envolvente térmica del edificio, evaluando distintas mejoras en la aislación general, en ventanas y en componentes específicos. Estas estrategias podrían generar ahorros acumulados de hasta 191 millones de pesos en 15 años, dependiendo del tipo de combustible utilizado.

Ambas propuestas son técnicamente viables y socialmente convenientes, considerando que el objetivo del CESFAM no es obtener rentabilidad financiera, sino mejorar la calidad de atención, reducir impactos ambientales y contribuir al bienestar de la comunidad. Por ello, cualquiera de las opciones puede ser considerada favorable, en función de las prioridades presupuestarias y operativas de la institución.

3. Abstract

Resumen

This study evaluates the energy and environmental performance of the CESFAM Coyhaique healthcare center through the analysis of two proposed interventions: (1) the implementation of a biomass pellet boiler combined with a photovoltaic system covering 50 % of the roof, and (2) the complete replacement of the heating system with electric boilers, supported by solar panels covering 100 % of the available roof area. The analysis estimates energy consumption, operating costs, and CO₂ emissions for each scenario, and includes a sensitivity analysis of the building's thermal envelope. Results show that both alternatives significantly reduce emissions and annual energy expenses. The biomass option proves to be more financially profitable (IRR 97 %, positive NPV), while the electric alternative offers operational robustness and lower direct environmental impact. Additionally, improvements to the thermal envelope could yield cumulative savings exceeding 190 million CLP over 15 years. The study concludes that both proposals are technically feasible and contribute positively to institutional energy performance and local sustainability goals.

4. Problema de Investigación

En Chile, los establecimientos de atención primaria de salud (CESFAM) cumplen un rol fundamental dentro de la red asistencial, operando como la primera línea de contacto entre la población y el sistema de salud. Estos recintos funcionan en horarios prolongados y, en muchos casos, durante las 24 horas del día los 7 días de la semana, lo que implica una operación energética constante para mantener condiciones adecuadas de confort térmico, iluminación y disponibilidad de equipamiento. Este funcionamiento continuo genera una demanda energética considerable, la cual se traduce en costos operacionales permanentes y en una huella ambiental relevante que las instituciones buscan reducir.

En el contexto energético nacional, Chile ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica y térmica, impulsado por el aumento de la población, la expansión de la infraestructura pública y el mayor uso de tecnologías en todos los sectores productivos y de servicios. *"Se proyecta que la demanda bruta de electricidad en el Sistema Eléctrico Nacional crecerá a una tasa promedio anual de 2,3 % en el período 2023-2042, impulsada por la electrificación de sectores productivos, el crecimiento económico y el desarrollo de nuevas cargas como la electromovilidad y el hidrógeno verde"* (C. N. de Energía, 2023). El sector salud no ha sido la excepción, presentando consumos elevados tanto en electricidad como en combustibles para calefacción y agua caliente. Este evento se ha intensificado sobretudo en zonas australes, como la región de Aysén donde está ubicado el CESFAM COYHAIQUE con SAR (Servicio de Atención Primaria de Urgencia de Alta Resolución) adosado. En estas regiones, debido a las condiciones climáticas más rigurosas como: bajas temperaturas, mayor humedad y vientos intensos. La demanda de energía para calefacción y climatización es significativamente mayor que en otras zonas del país. Estas características hacen que los estándares de diseño aplicados en

zonas de clima templado no siempre respondan de manera óptima a las necesidades energéticas de edificios en la zona sur austral.

A esto se suma que, a nivel de normativa, si bien existen reglamentos térmicos nacionales que establecen parámetros de eficiencia mínimos para envolventes y sistemas constructivos, la realidad de operación en establecimientos de salud de la zona austral puede exceder estos estándares, generando mayores pérdidas energéticas y aumentando el consumo de combustibles fósiles y electricidad. Esta situación plantea la necesidad de investigar y comprender de manera más profunda el comportamiento energético específico de los CESFAM ubicados en estas latitudes, considerando que las condiciones climáticas extremas, los horarios extendidos y la complejidad de la atención pueden derivar en patrones de consumo muy diferentes a los de recintos similares en el centro o norte del país.

Por otro lado, los costos de la energía en estas regiones suelen ser más elevados y la dependencia de combustibles como el diésel incrementa tanto la huella de carbono como la vulnerabilidad del sistema ante variaciones de precios y dificultades logísticas de abastecimiento. Frente a este escenario, surge el problema de investigación de cómo optimizar el uso de energía en este tipo de establecimientos, integrando mejoras en la envolvente, en los sistemas de ventilación, iluminación, equipos eléctricos y producción de agua caliente, así como la incorporación de energías renovables, por ejemplo mediante paneles fotovoltaicos, que permitan reducir el consumo energético proveniente de la red y mejorar la eficiencia global del edificio.

De este modo, la investigación busca responder a la pregunta de cómo las condiciones particulares de la zona austral chilena afectan el comportamiento energético de un CESFAM, en particular el de la ciudad de Coyhaique y qué medidas pueden implementarse para disminuir su consumo y mejorar su eficiencia sin comprometer el funcionamiento ni la calidad de atención. Este problema

se aborda entendiendo al CESFAM como parte de un sistema público más amplio, donde la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos energéticos son fundamentales para garantizar su operación continua y responsable con el entorno.

4.0.1. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es evaluar el desempeño energético del CESFAM Coyhaique con SAR adosado, según el diseño especificado en la licitación pública, y desarrollar una propuesta de mejora técnica que permita aumentar su eficiencia energética global, reducir los costos operativos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando herramientas de modelación energética como RETScreen Expert.

4.0.2. Objetivos Específicos

1. Analizar las características constructivas, sistemas energéticos y condiciones climáticas del diseño base del CESFAM Coyhaique, según la documentación técnica de la licitación y el informe de eficiencia energética.
2. Estimar los consumos térmicos y eléctricos anuales del diseño base, modelando su desempeño energético mediante herramientas de simulación como RETScreen, e identificando los principales puntos críticos de eficiencia.
3. Diseñar una propuesta de mejora energética que incorpore estrategias pasivas, optimización de la envolvente térmica y la eventual implementación de tecnologías activas como bombas de calor o cogeneración térmico-eléctrica.
4. Evaluar comparativamente ambos escenarios (base y propuesta) bajo criterios técnicos, económicos y ambientales, incluyendo indicadores como consumo energético, ahorro económico, emisiones evitadas, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y período de recuperación.
5. Formular recomendaciones aplicables a futuras licitaciones de infraestructura de salud en

zonas australes de Chile, basadas en los resultados obtenidos y la replicabilidad de las medidas propuestas.

5. Marco Teórico

5.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía térmica se desplaza de una región con mayor temperatura a otra de menor temperatura. Este fenómeno es fundamental en ingeniería térmica, climatización, procesos industriales y diseño de edificaciones. Existen tres mecanismos principales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos mecanismos se describe a continuación.

5.1.1. Conducción

La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de un material sólido o entre materiales en contacto directo, sin que exista movimiento macroscópico de materia. La energía térmica se propaga por interacción de las partículas a nivel microscópico.

El fenómeno se describe mediante la **ley de Fourier**:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

donde:

- q es el flujo de calor (W),
- k es la conductividad térmica del material (W/m · K),
- A es el área de la sección transversal (m²),
- $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura (K/m).

En estado estable y una dimensión, la ecuación se simplifica a:

$$q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

donde L es el espesor del material.

5.1.2. Convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento (líquido o gas) que está en contacto con dicha superficie. El calor se transfiere por combinación de conducción (en la capa límite del fluido) y transporte de masa debido al movimiento del fluido.

El fenómeno se describe con la **ley de enfriamiento de Newton**:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

donde:

- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- T_s es la temperatura de la superficie ($^{\circ}\text{C}$ o K),
- T_f es la temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$ o K).

La convección puede ser:

- *Natural*, cuando el movimiento del fluido es generado por diferencias de densidad debidas a gradientes de temperatura.

- *Forzada*, cuando el movimiento es inducido por dispositivos externos como ventiladores o bombas.

5.1.3. Radiación

La radiación es la transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material. Todo cuerpo emite energía radiante proporcional a su temperatura absoluta.

El fenómeno se describe mediante la **ley de Stefan–Boltzmann**:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{entorno}^4)$$

donde:

- ε es la emisividad de la superficie (adimensional, entre 0 y 1),
- σ es la constante de Stefan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$),
- T_s es la temperatura absoluta de la superficie (K),
- $T_{entorno}$ es la temperatura absoluta de las superficies circundantes (K).

A diferencia de la conducción y la convección, la radiación puede producirse incluso en el vacío, lo que la hace especialmente relevante en aplicaciones espaciales o donde no hay contacto con un fluido o sólido.

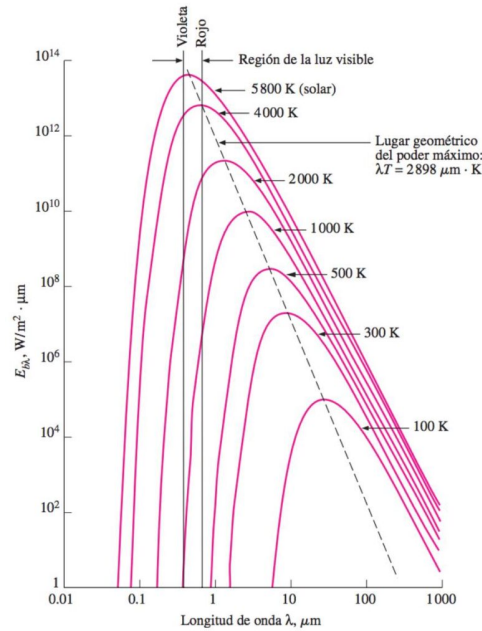


Figura 5.1: Distribución espectral de la radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas, mostrando la región de la luz visible y la ley de desplazamiento de Wien.

5.2. Confort térmico

El confort térmico es una condición del ambiente interior en la que una persona expresa satisfacción con el entorno térmico. Se trata de un concepto fundamental en el diseño de edificios, sistemas de climatización y espacios laborales, ya que está directamente relacionado con el bienestar, la salud y la productividad de los ocupantes. Para alcanzar el confort térmico, es necesario mantener un equilibrio entre el calor producido por el cuerpo humano y el calor intercambiado con el entorno mediante procesos de conducción, convección, radiación y evaporación.

El cuerpo humano genera calor como resultado de la actividad metabólica. Para mantener una temperatura corporal estable, este calor debe disiparse al ambiente a una tasa adecuada. Cuando la disipación no es suficiente, las personas perciben calor excesivo; si la disipación es mayor a lo generado, sienten frío. El confort térmico, por tanto, se logra cuando la temperatura interna del

cuerpo puede mantenerse dentro de rangos fisiológicos sin que el organismo tenga que realizar esfuerzos excesivos de regulación, como sudar en exceso o temblar.

Para cuantificar y diseñar condiciones de confort térmico se utilizan modelos internacionales, como el índice *Predicted Mean Vote* (PMV) y el *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), definidos en la norma ISO 7730. El PMV se calcula a partir de un balance energético entre el cuerpo y el ambiente, considerando variables como la temperatura del aire, la temperatura media radiante, la velocidad del aire, la humedad relativa, el nivel de actividad metabólica y la resistencia térmica de la vestimenta. El modelo predice el voto térmico promedio de un gran grupo de personas en una escala de -3 (frío) a +3 (calor), siendo 0 el confort neutro.

La ecuación general de balance para el cálculo del PMV se expresa como:

$$PMV = \left[0,303e^{-0,036M} + 0,028 \right] \cdot [(M - W) - H]$$

donde:

- M es la tasa metabólica (W/m^2),
- W es el trabajo mecánico externo (W/m^2),
- H es la suma de todas las pérdidas de calor del cuerpo por convección, radiación y evaporación (W/m^2).

Una vez obtenido el PMV, el porcentaje de insatisfacción se obtiene con:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2}$$

Estos índices permiten evaluar la calidad térmica del ambiente y establecer rangos aceptables. Por ejemplo, según la ISO 7730¹, para alcanzar un nivel de confort de categoría A se requiere que el PMV se encuentre entre -0.2 y +0.2, lo que corresponde a un PPD menor al 6 %.

Además de los modelos numéricos, se considera el concepto de temperatura operativa, que combina la temperatura del aire y la temperatura media radiante ponderadas según la velocidad del aire. Este valor resume la sensación térmica global que experimentan los ocupantes. Factores como la humedad relativa también son determinantes, ya que valores muy altos dificultan la evaporación del sudor y valores muy bajos pueden causar sequedad en las mucosas.

En términos prácticos, el confort térmico se logra mediante un diseño integrado del edificio y sus sistemas de climatización, considerando aislamiento, ventilación, control de humedad y regulación de la temperatura. En climas extremos o en espacios industriales con fuentes de calor internas, la correcta gestión de estos factores resulta esencial para garantizar condiciones seguras y confortables para las personas.

¹Norma internacional que establece métodos para determinar y evaluar el confort térmico en ambientes interiores.

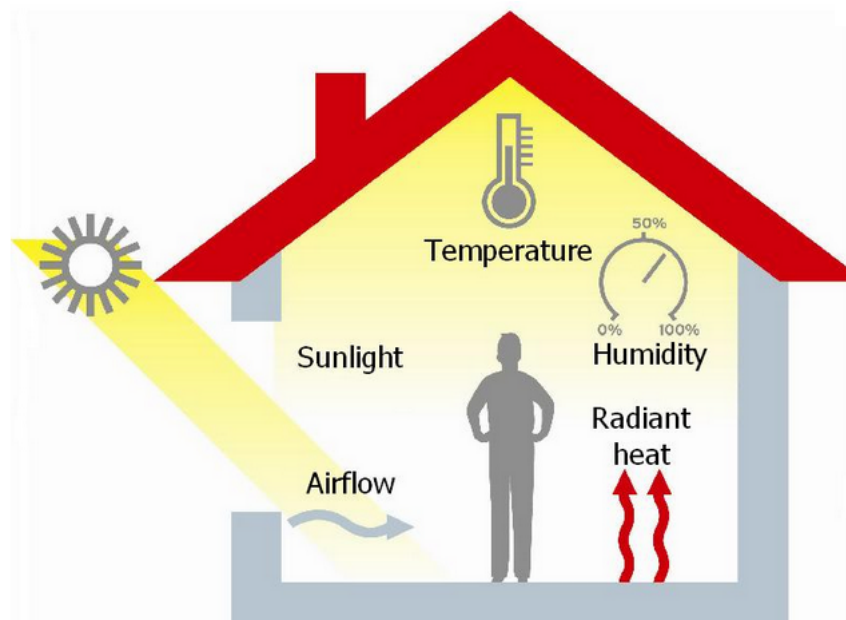


Figura 5.2: Factores principales que influyen en el confort térmico: temperatura, humedad, radiación, flujo de aire y radiación solar.

5.3. Resistencia térmica

La resistencia térmica, o valor R , es la medida de la capacidad de un material o conjunto de materiales para oponerse al flujo de calor. Se expresa en $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ y su cálculo depende del espesor del material y de su conductividad térmica. A mayor resistencia térmica, menor será el flujo de calor que atraviesa el elemento, lo que implica mejores propiedades de aislamiento y, por ende, una envolvente más eficiente. Este concepto es esencial para seleccionar materiales en el diseño de muros, techos, pisos y otros elementos constructivos, buscando cumplir con los requisitos de eficiencia energética establecidos por la normativa nacional (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2022).

La fórmula general para calcular la resistencia térmica de una capa de material es:

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

donde R es la resistencia térmica de la capa, e es el espesor del material en metros, y λ es la conductividad térmica del material en W/mK. Cuando un elemento está compuesto por varias capas, se suman las resistencias térmicas de cada capa para obtener la resistencia térmica total, la cual se utiliza posteriormente para calcular la transmitancia térmica. Estos parámetros son fundamentales para evaluar el desempeño de la envolvente de un CESFAM y proponer mejoras que reduzcan el consumo energético.

5.4. Transmitancia térmica

La transmitancia térmica, también conocida como coeficiente U , es una propiedad física que describe la cantidad de calor que atraviesa un elemento constructivo por unidad de superficie y por unidad de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Se expresa generalmente en W/m²K y es un parámetro fundamental en el diseño y evaluación de la envolvente de un edificio. Cuanto menor sea el valor de transmitancia térmica de un muro, techo, piso, ventana o puerta, mayor será su capacidad de aislamiento, lo que se traduce en menores pérdidas o ganancias de calor. En términos prácticos, la transmitancia térmica permite estimar la eficiencia de los materiales constructivos para reducir el consumo energético requerido para mantener condiciones de confort interior, especialmente en zonas con climas extremos como la zona austral de Chile (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2022).

La fórmula general para calcular la transmitancia térmica es la siguiente:

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}}$$

donde U es la transmitancia térmica y R_{total} corresponde a la resistencia térmica total del

elemento. Este valor se utiliza en cálculos de balance energético para proyectar las cargas de calefacción y refrigeración de un edificio.

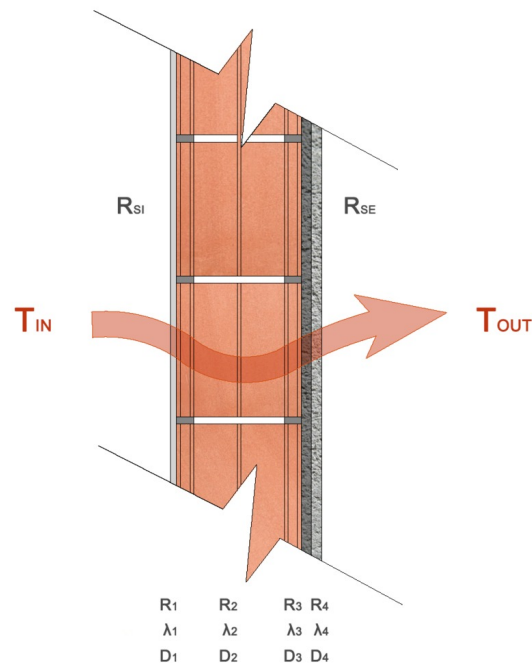


Figura 5.3: Esquema de cómo funciona la transmitancia térmica, mostrando el flujo de calor a través de un material y su relación con la temperatura interior y exterior.

5.5. Energías renovables y no renovables

En el contexto energético global es fundamental comprender la diferencia entre energías renovables y no renovables, ya que de ello depende gran parte de las estrategias de eficiencia y sostenibilidad aplicadas a los edificios públicos. Las energías no renovables son aquellas que provienen de recursos finitos, cuya extracción y utilización implican un agotamiento progresivo y un impacto ambiental considerable. Entre estas se encuentran el carbón, el petróleo, el gas natural y la energía nuclear. El carbón es un combustible fósil sólido ampliamente utilizado para generación eléctrica, pero con elevadas emisiones de dióxido de carbono y contaminantes. El petróleo, por su parte, se utiliza en transporte, calefacción y generación de energía, generando también una importante huella de

carbón. El gas natural se considera menos contaminante que los anteriores, aunque sigue siendo un recurso no renovable con emisiones asociadas. Finalmente, la energía nuclear, a pesar de no emitir dióxido de carbono durante la operación, depende de recursos como el uranio y genera residuos radiactivos de compleja gestión.

Por otro lado, las energías renovables son aquellas que provienen de recursos naturales capaces de regenerarse de forma continua, permitiendo un uso sostenible y con menor impacto ambiental. Entre ellas se encuentra la energía solar, que aprovecha la radiación del sol; la energía eólica, que transforma la fuerza del viento en electricidad; la energía hidráulica, que utiliza el movimiento del agua para generar energía; la biomasa, que se obtiene de materiales orgánicos como residuos agrícolas o pellets para producir calor o electricidad; y la energía geotérmica, que aprovecha el calor interno de la Tierra. Estas fuentes renovables han ido adquiriendo mayor relevancia en proyectos públicos, ya que permiten reducir costos operativos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo energético. *El uso de fuentes renovables no convencionales, como la energía solar, eólica y geotérmica, en instalaciones públicas y privadas permite reducir costos operacionales a largo plazo y contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, favoreciendo el cumplimiento de las metas de carbono neutralidad* (M. de Energía, 2022).

Dentro de este grupo, la energía solar se destaca como una de las más accesibles y versátiles para incorporar en edificios como un CESFAM. La energía solar corresponde a la radiación electromagnética proveniente del sol, que puede aprovecharse mediante dos tecnologías principales. Por un lado, la energía solar térmica emplea colectores para calentar agua o aire, y por otro lado, la energía solar fotovoltaica transforma la radiación directamente en electricidad. Esta última ha sido considerada como una alternativa viable para disminuir el consumo de la red eléctrica y

complementar la demanda energética en establecimientos de salud, incluso en zonas australes donde la radiación no es tan alta como en el norte del país, pero sí suficiente para generar un aporte significativo.

5.6. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son dispositivos diseñados para convertir directamente la energía proveniente de la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Están formados por múltiples celdas solares construidas principalmente con materiales semiconductores, como el silicio monocristalino y policristalino, o tecnologías más recientes como las celdas PERC y TOPCon. Estas celdas están dispuestas dentro de un marco protector, recubiertas por vidrio templado y encapsuladas para garantizar su durabilidad ante condiciones ambientales adversas.

Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre la superficie del panel, generan pares electrón-hueco dentro del semiconductor, lo que se conoce como efecto fotovoltaico. Un campo eléctrico interno de la celda provoca que los electrones se desplacen hacia un lado y los huecos hacia el otro, generando una diferencia de potencial y, por ende, una corriente eléctrica cuando el circuito se cierra y se conecta una carga externa. De esta manera, la energía luminosa se convierte en energía eléctrica utilizable.

En términos de tecnología de celdas, existen variantes que mejoran la eficiencia. Una de ellas es la tecnología **PERC** (Passivated Emitter Rear Cell), que incorpora una capa pasivada en la parte trasera de la celda para reflejar la luz que no fue absorbida en el primer paso, aumentando así la cantidad de fotones convertidos en electricidad. Otra tecnología avanzada es **TOPCon** (Tunnel Oxide Passivated Contact), la cual utiliza una fina capa de óxido y contactos pasivados que reducen las pérdidas de recombinación de electrones, incrementando significativamente la

eficiencia y mejorando el desempeño en condiciones de alta temperatura.

El comportamiento de una celda solar puede representarse mediante un modelo eléctrico compuesto por una fuente de corriente en paralelo con un diodo y resistencias parasitarias. La relación corriente–voltaje de la celda se describe mediante la ecuación:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

donde I es la corriente de salida, V la tensión, I_{ph} la corriente generada por la luz, I_0 la corriente de saturación del diodo, R_s la resistencia serie, R_{sh} la resistencia en derivación, n el factor de idealidad del diodo y V_T el voltaje térmico dado por $V_T = \frac{kT}{q}$.

La potencia generada por el panel se obtiene a partir del producto entre la tensión y la corriente, $P = V \cdot I$. En condiciones estándar, conocidas como STC (1000 W/m², 25 °C, AM 1.5), se define el punto de operación donde el producto $V \times I$ es máximo, conocido como punto de máxima potencia, dado por $P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$, donde V_{mp} e I_{mp} son la tensión y corriente en ese punto, respectivamente. A partir de este valor se calcula la eficiencia del módulo mediante la expresión:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \cdot A}$$

donde G es la irradiancia incidente y A el área del panel.

Además, la potencia de salida del panel varía con la temperatura de la celda de acuerdo con el coeficiente térmico γ , según la fórmula:

$$P(T) = P_{STC} [1 + \gamma(T - T_{STC})]$$

donde T es la temperatura de la celda, T_{STC} la temperatura estándar y γ el coeficiente térmico.

En términos prácticos, las celdas se conectan en serie para incrementar el voltaje y en paralelo para incrementar la corriente, configurando así módulos y arreglos fotovoltaicos que se adaptan a distintas necesidades de potencia. Además, se emplean algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) para que el sistema opere constantemente en las condiciones óptimas, maximizando la producción de energía.

En sistemas fotovoltaicos, el **grado de inclinación** corresponde al ángulo entre el plano del panel solar y la horizontal del terreno. Este parámetro es fundamental para determinar la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie del módulo a lo largo del día y del año. Una correcta inclinación permite maximizar la captación de energía solar, ya que busca orientar el panel lo más perpendicular posible a la trayectoria del sol. Por otro lado, el **azimut** representa el ángulo de orientación del panel respecto al norte geográfico, medido en el plano horizontal.

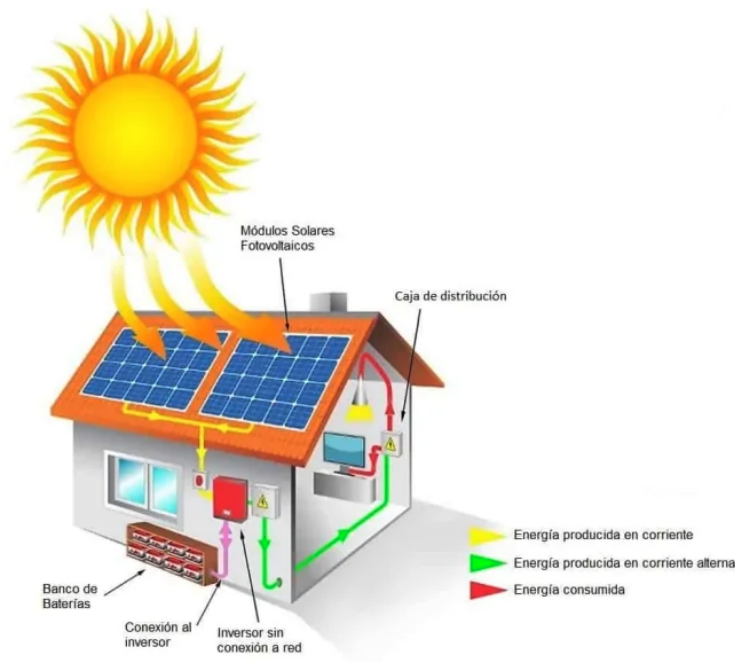


Figura 5.4: Esquema de conversión de energía solar a electricidad mediante paneles fotovoltaicos.

5.7. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) son componentes gaseosos de la atmósfera que absorben y emiten radiación en el rango infrarrojo, generando el fenómeno conocido como efecto invernadero. Este proceso es esencial para mantener una temperatura media en la Tierra adecuada para la vida, pero las actividades humanas han incrementado la concentración de estos gases, intensificando el fenómeno y contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático. Entre las actividades que aumentan las emisiones de GEI se encuentran la combustión de combustibles fósiles para generación de energía, el transporte, los procesos industriales y los cambios de uso del suelo, como la deforestación. Según el Ministerio del Medio Ambiente *El principal GEI emitido fue el CO_2 (78 %), seguido del CH_4 (13 %), N_2O (6 %) y los gases fluorados (3 %).*² (del Medio Ambiente de Chile, 2025).

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, los principales GEI se clasifican en varios grupos. El dióxido de carbono (CO_2) es el gas de referencia, proveniente principalmente de la quema de carbón, petróleo y gas natural, así como de procesos de fabricación de cemento y cambios en el uso de la tierra. El metano (CH_4), con un potencial de calentamiento global mucho mayor que el del dióxido de carbono a corto plazo, proviene de la ganadería, los rellenos sanitarios y la extracción de combustibles fósiles. El óxido nitroso (N_2O) se origina principalmente en actividades agrícolas y ciertos procesos industriales. Además, existen los gases fluorados, como los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6) y trifluoruro de nitrógeno (NF_3), empleados en refrigeración y procesos eléctricos, que aunque se emiten en menores cantidades, poseen un potencial de calentamiento global extremadamente alto. (IPCC, 2021).

²Ministerio del Medio Ambiente de Chile, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*, disponible en: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones/> (consultado el 23 de julio de 2025).

Para efectos de medición, las emisiones de estos gases suelen expresarse en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), lo que permite comparar su impacto climático relativo utilizando el potencial de calentamiento global (GWP) de cada uno. Esta clasificación es particularmente relevante en el análisis del consumo energético de establecimientos como un CESFAM, ya que el uso de electricidad y combustibles fósiles está directamente asociado a la generación de GEI. Por ello, la implementación de medidas de eficiencia energética y la incorporación de energías renovables son estrategias clave para reducir las emisiones y avanzar hacia un funcionamiento más sostenible (del Medio Ambiente de Chile, 2022).

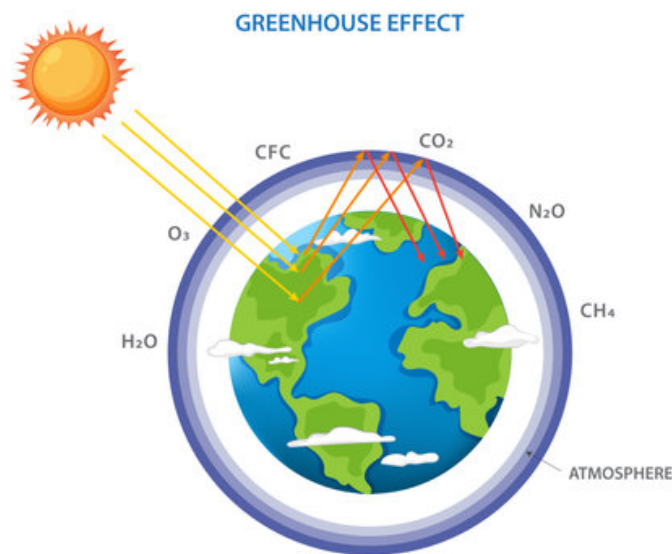


Figura 5.5: Esquema ilustrativo de los principales gases de efecto invernadero y sus fuentes de emisión.

5.8. Eficiencia energética

La eficiencia energética es un concepto clave dentro del diseño y operación de edificaciones modernas, ya que se refiere a la relación entre la cantidad de energía consumida y el servicio útil que se obtiene a partir de dicha energía. En términos generales, un sistema, equipo o edificio es

energéticamente eficiente cuando logra entregar las mismas prestaciones utilizando menos recursos energéticos, lo que se traduce en menores costos de operación y una reducción significativa de impactos ambientales (M. de Energía, 2022) .

Matemáticamente, la eficiencia energética puede expresarse como:

$$\eta = \frac{\text{Servicio energético útil entregado}}{\text{Energía consumida}}$$

donde η es la eficiencia, expresada normalmente como un porcentaje. En el caso de un edificio, el servicio energético útil puede entenderse como el confort térmico alcanzado, la iluminación adecuada y la operación de todos los sistemas necesarios para su funcionamiento. Este concepto se utiliza para evaluar el desempeño de sistemas individuales, como calderas o bombas, pero también puede aplicarse al balance energético global de una edificación.

La eficiencia energética en edificaciones se define como la relación entre la energía consumida y el servicio energético entregado. Un edificio energéticamente eficiente entrega las condiciones de confort térmico, calidad de aire interior, iluminación y servicios necesarios utilizando la menor cantidad de energía posible. Este concepto es fundamental en el contexto de la sostenibilidad, pues permite reducir el impacto ambiental, los costos operacionales y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a la operación del edificio (Ministerio de Energía de Chile, 2023a).

En edificaciones, el cálculo de la eficiencia energética no solo considera la potencia instalada, sino también el tiempo de uso y la interacción entre sistemas. Por ejemplo, el consumo eléctrico puede expresarse como:

$$E = P \times t$$

donde E es la energía consumida en kilowatt-hora (kWh), P la potencia en kilowatts (kW) y t el tiempo de operación en horas. De este modo, analizar la eficiencia implica comprender tanto la demanda energética como las condiciones de uso de los sistemas de climatización, ventilación, iluminación y equipamiento.

En el caso de establecimientos de salud, como un CESFAM, la eficiencia energética es especialmente relevante debido a que operan bajo regímenes de funcionamiento continuo (24 horas al día, 7 días a la semana), presentan altas exigencias de confort térmico y deben cumplir estándares normativos más estrictos. Estas condiciones implican que el consumo energético de climatización, iluminación, ventilación y equipos eléctricos tiene un peso significativo en el balance energético global. Por ello, implementar estrategias de eficiencia energética en este tipo de edificios contribuye directamente a mejorar su desempeño, reducir gastos operacionales y disminuir las emisiones de GEI asociadas a su operación.

5.9. Centros de Salud Familiar (CESFAM)

Un Centro de Salud Familiar (CESFAM) es un establecimiento de atención primaria que tiene como objetivo satisfacer las necesidades de salud de una población determinada bajo un enfoque familiar y comunitario. Su diseño se realiza siguiendo estándares definidos por el Ministerio de Salud (MINSAL) y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), los cuales establecen dimensiones mínimas de recintos, programas médicos arquitectónicos (PMA) y características constructivas generales (Ministerio de Salud de Chile, 2018).

5.10. Normativa Técnica y Legal Aplicable al Proyecto CESFAM Coyhaique

La construcción y operación del CESFAM Coyhaique con SAR adosado debe ajustarse a un marco normativo amplio y estricto, compuesto por leyes nacionales, reglamentos técnicos sectoriales y normas chilenas oficiales (NCh) emitidas por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Estas regulaciones establecen los requisitos mínimos para garantizar la seguridad estructural, la eficiencia energética, la higiene, la accesibilidad, la funcionalidad clínica y la interoperabilidad de los sistemas constructivos y de instalaciones.

5.10.1. Normativa general de edificación

En primer lugar, toda la edificación debe cumplir con la **Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)**, en especial su artículo 4.1.10 de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2024, que regula el cumplimiento de exigencias térmicas según zona climática. Coyhaique se encuentra en la **Zona Térmica I**, correspondiente a una de las más rigurosas del país, lo que implica altos estándares de aislamiento térmico y eficiencia en sistemas de calefacción. Esta zonificación está respaldada por la **Norma Chilena NCh 1079 Of2008**³, que clasifica el territorio chileno en zonas térmicas y recomienda criterios de diseño para cada una de ellas.

Además, deben cumplirse todas las normas técnicas oficiales del **Instituto Nacional de Normalización (INN)**, en sus versiones más recientes. Cuando existan normas alternativas, debe aplicarse la más exigente, particularmente en infraestructura de salud pública.

³ «NCh1079.Of77: Arquitectura y construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico», 1977.

5.10.2. Normas específicas por especialidad

En instalaciones eléctricas, todo el diseño y ejecución debe cumplir con las disposiciones de la **Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)**, en cuanto a materiales, circuitos, protecciones, puestas a tierra y respaldo energético. Las instalaciones deben incluir grupos electrógenos con autonomía mínima de 72 horas bajo potencia límite.

Para climatización y ventilación mecánica, se exige el cumplimiento del proyecto base, más todas las normas vigentes que apliquen a sistemas HVAC en establecimientos de salud. Estas incluyen criterios de renovación de aire, recuperación térmica y control de humedad para prevenir riesgos sanitarios.

En instalaciones sanitarias, se debe aplicar la **NCh 691 Of2015** («NCh691:2015 Agua potable — Producción, conducción, almacenamiento y distribución — Requisitos de diseño», 2015) para conducción y distribución de agua potable, junto con la **NCh 1104 Of1998** sobre presentación de proyectos sanitarios. Ambas normas establecen los requisitos técnicos y de presentación documental ante la autoridad sanitaria correspondiente.

Las redes de gases clínicos deben diseñarse y ejecutarse conforme a la **NCh 2196 Of1994** (de Salud de Chile, 1994) ., que regula el almacenamiento, distribución y señalización de oxígeno, aire comprimido, óxido nitroso y vacío clínico. Esto garantiza condiciones de presión, pureza y seguridad en zonas críticas como urgencia, box de procedimientos y salas de reanimación.

En materia de protección contra incendios, se requiere cumplir con las exigencias normativas aplicables a sistemas de red húmeda, red seca, extintores, señalética y compartimentación. Todos estos elementos deben diseñarse en conformidad con el Reglamento Nacional de Protección Contra Incendios y con las instrucciones del Cuerpo de Bomberos y el Ministerio de Salud.

Para la especialidad de corrientes débiles y telecomunicaciones, se deben cumplir las normas de telecomunicaciones vigentes en Chile y aplicar los estándares requeridos para redes de datos, citofonía, telefonía, circuito cerrado de televisión (CCTV), y conexión a sistemas de gestión centralizada.

5.10.3. Normas complementarias de construcción

El proyecto también hace referencia a un conjunto de normas complementarias para aspectos constructivos generales, que incluyen:

- **NCh348 1999**⁴: sobre cierros provisorios de obra.
- **NCh350 Of2000**⁵: relativa a seguridad en instalaciones eléctricas temporales.
- **NCh353 Of2000**⁶: para la cubicación de obras en construcción.
- **NCh1198 Of2006**⁷: referida a construcciones en madera.

Estas normas aseguran que las actividades de obra se desarrollen bajo condiciones controladas, seguras y verificables por la inspección técnica correspondiente.

5.10.4. Regulación institucional y sectorial

El diseño y ejecución también debe considerar los siguientes reglamentos y entidades fiscalizadoras, como el Reglamento del **Ministerio de Salud (MINSAL)** y el **Servicio de Salud de Aysén**, en lo relativo a espacios mínimos, funcionalidad clínica y protocolos operativos. El Reglamento

⁴«NCh348.Of1999 Cierros provisionales — Requisitos generales de seguridad», 1999.

⁵«NCh350.Of2000 Construcción — Seguridad — Instalaciones eléctricas provisionales — Requisitos», 2000.

⁶«Especialidad Construcción – Módulo Cubicación de Materiales e Insumos», 2023.

⁷De Vivienda y Urbanismo de Chile, 2017.

de la **Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)**, para validación de redes de agua potable y aguas servidas. El Reglamento de instalaciones interiores de alumbrado y fuerza motriz. Las Ordenanzas municipales vigentes en Coyhaique. Por último, las Disposiciones del **Código del Trabajo** sobre faenas de construcción, higiene y seguridad laboral. En conjunto, este cuerpo normativo establece las bases legales y técnicas obligatorias para la habilitación, uso y operación del CESFAM Coyhaique, asegurando cumplimiento con los estándares nacionales en materia de eficiencia energética, seguridad, salubridad y continuidad operativa de establecimientos de salud.

5.10.5. Requisitos Mínimos de Construcción

El proyecto de construcción del CESFAM Coyhaique contempla una edificación de una superficie total de 3.738 m², emplazada en la calle Dos, Lote 1, del sector Escuela Agrícola de la comuna de Coyhaique. La obra debe ejecutarse conforme a una serie de estándares técnicos y normativos que aseguren la calidad, eficiencia y sustentabilidad del establecimiento de salud.

En cuanto a los requisitos, se exige un desempeño térmico mínimo de la envolvente del edificio, determinado por valores máximos de transmitancia térmica (U-Value) que deben cumplir los elementos constructivos: 0,35 W/m² · K para los muros exteriores, 0,32 W/m² · K para el piso, 3,0 W/m² · K para los vidrios, independiente de su orientación y 0,25 W/m² · K para techumbre. Estas exigencias se alinean con la zonificación térmica de la NCh 1079:2008 (de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2024) , considerando el clima riguroso de la Región de Aysén.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, se exige una arquitectura bioclimática orientada al norte para zonas de uso prolongado, incorporación de vestíbulos dobles en accesos principales para minimizar pérdidas térmicas, sistemas de protección solar en fachadas y uso de materiales sustentables en todo su ciclo de vida. El sistema eléctrico debe incorporar control por zonas, con

sensores de movimiento y fotosensores, además de medidores remotos de consumo con protocolo tipo Modbus.

5.11. Simulación de Monte Carlo

La **Simulación de Monte Carlo** es un método estadístico utilizado para modelar la incertidumbre en sistemas complejos, particularmente en la evaluación de proyectos financieros, análisis de riesgo y procesos energéticos donde intervienen variables aleatorias. Este método permite obtener una distribución probabilística de los resultados posibles mediante la repetición masiva de simulaciones con entradas variables, generadas a partir de distribuciones de probabilidad previamente definidas.

En el contexto de eficiencia energética, la simulación de Monte Carlo permite evaluar cómo pueden variar indicadores clave, como la **Tasa Interna de Retorno (TIR)** o el **Valor Actual Neto (VAN)**, frente a la incertidumbre en parámetros económicos relevantes: costos de inversión, precios de energía, tasas de descuento, costos operacionales, entre otros.

El procedimiento general del método es el siguiente:

1. Se identifican las variables de entrada inciertas del modelo (por ejemplo, precio del combustible, inversión inicial).
2. Se asigna una **distribución de probabilidad** a cada una de ellas (por ejemplo, distribución triangular, normal o uniforme).
3. Se generan **valores aleatorios** para cada variable según su distribución, utilizando un generador de números pseudoaleatorios.

4. Se ejecuta el modelo para ese conjunto de valores y se registra el resultado (por ejemplo, la TIR simulada).
5. Se repite el proceso **N veces** (normalmente cientos o miles), acumulando los resultados en una distribución empírica.

Este procedimiento produce una estimación de la función de densidad de probabilidad del resultado, permitiendo evaluar no sólo el valor esperado, sino también la **variabilidad**, el **riesgo** y los **intervalos de confianza** asociados al indicador.

En términos matemáticos, si $X_1, X_2, \dots, X_n$ son las variables aleatorias de entrada con funciones de densidad $f_i(x_i)$, y $Y = g(X_1, \dots, X_n)$ es el resultado del modelo (por ejemplo, la TIR), entonces la simulación busca aproximar la distribución de Y mediante repeticiones aleatorias:

$$Y^{(k)} = g\left(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_n^{(k)}\right) \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, N$$

A partir del conjunto de resultados $\{Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(N)}\}$ se pueden estimar estadísticas como:

- Media esperada: $E[Y] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y^{(k)}$
- Desviación estándar: $\sigma_Y \approx \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(Y^{(k)} - \bar{Y}\right)^2}$
- Intervalos de confianza percentílicos (por ejemplo, del 5 % al 95 %)
- Probabilidad de ocurrencia de un resultado específico, como $P(VAN > 0)$

En el caso del presente proyecto, la simulación de Monte Carlo se aplicó para evaluar la **sensibilidad de la TIR** frente a variaciones de parámetros clave como el *costo del combustible en*

el caso base, los *costos iniciales de inversión* y el *costo del combustible en el caso propuesto*. Si bien se puede calcular una media esperada, en línea con las recomendaciones de análisis de riesgo energético, se prioriza el análisis de la **probabilidad de ocurrencia de resultados favorables**, como la probabilidad de que el VAN sea positivo. Esta forma de análisis ofrece una visión más robusta del comportamiento financiero del proyecto frente a escenarios inciertos.

6. Metodología

6.1. Enfoque del estudio

El presente estudio adopta un enfoque aplicado y cuantitativo, orientado a evaluar el desempeño energético de un centro de salud en etapa de licitación, tomando como caso base el proyecto del CESFAM con SAR adosado en la comuna de Coyhaique. La metodología se estructura en dos etapas principales.

En primer lugar, se realiza un **análisis energético del diseño base**, utilizando la información contenida en los documentos oficiales de licitación, como las especificaciones técnicas, el informe de eficiencia energética y los antecedentes arquitectónicos y constructivos. Este análisis permite caracterizar el consumo energético proyectado, el tipo de combustibles contemplados, los sistemas de climatización y la intensidad de uso energético y de emisiones, considerando condiciones climáticas locales. Para esta etapa se empleará el software **RETScreen Expert**, que permite modelar el comportamiento energético del edificio en función de parámetros técnicos, climáticos y de operación.

En segundo lugar, se plantea una **propuesta de mejora basada en criterios de eficiencia**

energética, la cual busca optimizar el rendimiento térmico del edificio mediante la incorporación de estrategias como mejoramiento en la envolvente térmica, sustitución o incorporación de sistemas energéticamente eficientes (como cogeneración), y ajustes en la gestión del uso energético. Esta propuesta es modelada nuevamente en RETScreen para evaluar su impacto en el consumo de energía, en las emisiones de gases de efecto invernadero y en los costos operacionales.

Finalmente, los resultados del escenario base y del escenario de mejora serán comparados en términos de consumo energético total (kWh/m^2), intensidad de emisiones (tCO_2/m^2) e intensidad de costos energéticos, permitiendo establecer el potencial real de mejora y su viabilidad técnica y económica.

7. Herramienta de evaluación energética RETScreen

Para la evaluación técnica, económica y ambiental del desempeño energético del CESFAM Coyhaique, se empleará el software **RETScreen Expert**, desarrollado por Natural Resources Canada. Esta herramienta permite modelar proyectos energéticos de forma integrada, considerando consumos, costos, emisiones y parámetros financieros clave. En el presente estudio, RETScreen será fundamental para establecer una comparación objetiva entre el diseño energético base propuesto en la licitación y una propuesta alternativa de mejora en eficiencia energética.

7.1. Objetivo del modelado en RETScreen

El uso de RETScreen tiene como objetivo cuantificar los consumos energéticos anuales del CESFAM (en electricidad y calor), así como los costos de operación y emisiones asociadas en dos escenarios:

- **Escenario 1 – Diseño base:** corresponde al diseño energético contenido en la licitación, el cual será ingresado según las características constructivas, climáticas y tecnológicas indicadas en los documentos oficiales.
- **Escenario 2 – Propuesta de mejora:** se simulará un rediseño con mejoras en eficiencia térmica, sustitución de sistemas convencionales por opciones más eficientes (como bombas de calor o cogeneración), y optimización del uso energético.

7.2. Estructura del modelado

El proceso de modelado con RETScreen se desarrollará siguiendo las siguientes etapas:

1. **Definición del proyecto:** se establece la ubicación geográfica (Coyhaique), los datos climáticos de referencia (incluyendo temperatura, radiación y grados-día de calefacción), y se define el tipo de proyecto como *Heating & Electricity Load Profile*.
2. **Ingreso de datos energéticos:** se introducen los valores estimados de consumo térmico y eléctrico anuales del edificio, según la superficie construida, la zona térmica y las tecnologías especificadas. Esta información será ajustada según datos del informe de eficiencia energética y referencias de literatura técnica.
3. **Simulación del diseño base:** se modela el comportamiento energético del CESFAM tal como está especificado en la licitación. Se detallan tecnologías utilizadas (caldera, bombas, luminarias, etc.), eficiencias, y costos asociados a energía primaria (ej. electricidad, pellet, GLP).
4. **Simulación de la propuesta de mejora:** se modela una versión alternativa del proyecto, con nuevas tecnologías (por ejemplo, sistema de cogeneración o bomba de calor de alto

COP), mejor aislación y sistemas de recuperación de calor. Se estiman nuevos consumos y se calculan ahorros.

5. **Evaluación financiera y ambiental:** RETScreen permite calcular automáticamente indicadores como el **Valor Actual Neto (VAN)**, la **Tasa Interna de Retorno (TIR)**, el **Período de Retorno (Payback)** y la cantidad de **emisiones de CO₂ evitadas** por año, lo que permitirá comparar objetivamente ambas alternativas.
6. **Análisis de sensibilidad:** se aplicará un análisis de sensibilidad para evaluar cómo varían los resultados ante cambios en variables críticas como el costo del combustible, la tasa de descuento o el rendimiento de los equipos.

7.3. Ventajas del uso de RETScreen

RETScreen permite modelar sistemas complejos con múltiples tecnologías de forma integrada. Ofrece una base climática validada (en este caso, para Coyhaique), cálculo automático de consumos y costos, y un módulo financiero completo que permite obtener resultados reproducibles y técnicamente justificados. Esto convierte a esta herramienta en una opción ideal para la evaluación de proyectos energéticos en infraestructura pública como centros de salud.

8. Ubicación geográfica y características generales

El proyecto se ubica en la ciudad de Coyhaique, capital de la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, en el sur de Chile. Las coordenadas exactas del terreno, según el informe de eficiencia energética del proyecto de licitación, son:

- Latitud: 45° 34' 28.39" Sur
- Longitud: 72° 02' 19.87" Oeste
- Altitud: 326 m.s.n.m.

La zona se encuentra inserta en la **Zona Térmica I** conforme a la clasificación de la Norma Chilena NCh1079 y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), lo que indica un clima de alta severidad climática en términos de calefacción.

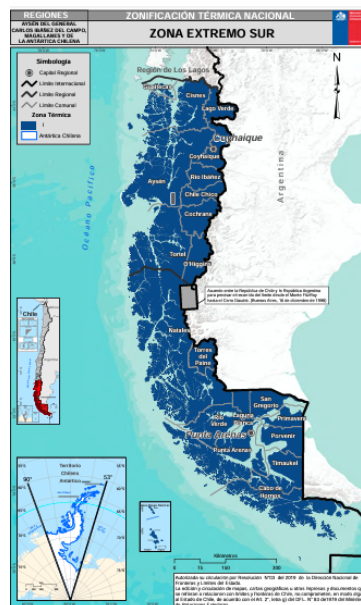


Figura 8.1: Mapa gubernamental de la zona I del país. Fuente: MINVU

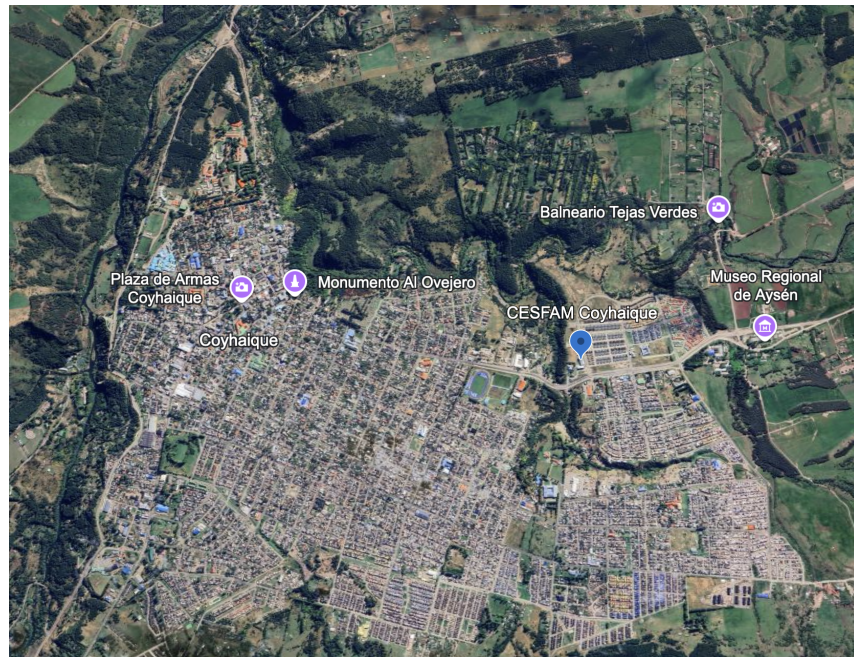


Figura 8.2: Ciudad de Coyhaique. (Fuente: Imagen extraída de Google Earth)



Figura 8.3: Zona de Construcción CESFAM de Coyhaique. (Fuente: Imagen extraída de Google Earth)



Figura 8.4: Renderizado Licitación CESFAM de Coyhaique. (Fuente: Radio Las Nieves)

8.1. Temperatura del aire

La ciudad de Coyhaique presenta una alta variabilidad térmica. A continuación, se muestran las temperaturas máxima, mínima y media mensual obtenidas del software Reetscreen:

Tabla 8.1: Temperaturas mensuales promedio en Coyhaique

Mes	Tº Percibida (°C)
Enero	9.0
Febrero	9.4
Marzo	7.3
Abril	4.4
Mayo	1.9
Junio	-0.5
Julio	-1.2
Agosto	-0.1
Septiembre	1.9
Octubre	4.0
Noviembre	5.9
Diciembre	7.7
Anual	4.1

Durante los meses más fríos, la temperatura media cae por debajo de los 5 °C, lo que implica una **alta carga térmica para calefacción** en el diseño de la edificación.

8.2. Humedad Relativa

Tabla 8.2: Humedades Relativas mensuales promedio en Coyhaique

Mes	HR Percibida (%)
Enero	77.3
Febrero	76.0
Marzo	81.1
Abril	87.7
Mayo	92.6
Junio	94.8
Julio	93.9
Agosto	91.8
Septiembre	86.9
Octubre	82.7
Noviembre	79.8
Diciembre	78.1
Anual	85.3

La humedad relativa promedio es elevada, especialmente en invierno, lo que favorece la aparición de condensaciones si no se diseñan adecuadamente los sistemas de ventilación.

8.3. Radiación solar

Los datos de radiación solar muestran alta disponibilidad en los meses de verano, y muy baja en invierno:

Tabla 8.3: Radiación Solar mensual promedio en Coyhaique

Mes	Radiación Solar Percibida (kWh/m ² /d)
Enero	6.01
Febrero	5.26
Marzo	3.72
Abril	2.31
Mayo	1.27
Junio	0.95
Julio	1.21
Agosto	1.95
Septiembre	3.21
Octubre	4.57
Noviembre	5.67
Diciembre	6.19
Anual	3.52

8.4. Velocidad del Viento

Tabla 8.4: Velocidad del viento mensual promedio en Coyhaique

Mes	Velocidad del viento Percibida (m/s)
Enero	3.9
Febrero	3.4
Marzo	3.2
Abril	3.3
Mayo	3.0
Junio	3.1
Julio	3.1
Agosto	3.2
Septiembre	3.2
Octubre	3.5
Noviembre	3.8
Diciembre	3.9
Anual	3.4

La velocidad del viento es moderada durante el año, siendo ligeramente mayor en verano. Esto puede apoyar estrategias de ventilación natural, aunque su efectividad es limitada en invierno.

8.5. Precipitación

Tabla 8.5: Precipitación mensual promedio en Coyhaique

Mes	Precipitación Percibida (mm)
Enero	65.41
Febrero	52.64
Marzo	73.16
Abril	87.90
Mayo	106.02
Junio	123.30
Julio	96.41
Agosto	94.24
Septiembre	67.80
Octubre	81.22
Noviembre	71.70
Diciembre	73.78
Anual	993.58

9. Caso Base: Diseño Energético del CESFAM Coyhaique

9.1. Energía

9.1.1. Equipos de calentamiento

El sistema de generación térmica proyectado para el CESFAM corresponde a una **caldera a petróleo diésel**, cuya selección y características fueron determinadas a partir del *Informe de Eficiencia Energética*⁸ entregado en la etapa de licitación del proyecto. De acuerdo con dicho informe, la caldera considera una **eficiencia estacional global del 80 %**, valor que incluye tanto el rendimiento de generación como las pérdidas de distribución y regulación del sistema. Esta eficiencia fue utilizada como base para la modelación energética y los cálculos de consumo anual de combustible del edificio.

9.1.2. Equipos de enfriamiento

Para el sistema de enfriamiento se proyecta la implementación de una **bomba de calor** alimentada también con **electricidad**. Esta tecnología fue especificada en el informe previo de la licitación y se considera adecuada para satisfacer los requerimientos de climatización de ciertos espacios. En la modelación energética, desarrollada con la herramienta *RETScreen*, se utilizó un **coeficiente de rendimiento estacional (COP estacional) de 0,5**, valor que representa el desempeño promedio del equipo durante un año completo de operación.

⁸Consultores Proyecto CESFAM, 2017.

9.2. Envolvente del edificio

El CESFAM presenta una envolvente térmica cuya orientación fue determinada a partir de los planos arquitectónicos entregados en la licitación del proyecto. Tras el análisis de estos antecedentes se estableció que el **norte geográfico del edificio se encuentra rotado 45°** respecto al eje principal de la fachada, orientación que fue considerada en la modelación energética. El horario de operación utilizado para la simulación corresponde a un régimen continuo de **24 horas al día, los 7 días de la semana**, dado el carácter asistencial permanente de este tipo de recintos de salud.

9.2.1. Paredes

El edificio *CESFAM Coyhaique* tiene una superficie construida total de **3.738 m²** distribuidos en dos niveles. Por lo tanto, el área construida por nivel corresponde a:

$$\text{Área por nivel} = \frac{3,738 \text{ m}^2}{2} = 1,869 \text{ m}^2$$

Su geometría en planta es aproximadamente cuadrada, aunque rotada 45°, lo cual permite suponer dimensiones simétricas en sus fachadas.

Asumiendo una planta cuadrada, el lado del edificio se puede estimar como:

$$\text{Lado} \approx \sqrt{1,869 \text{ m}^2} \approx 43,25 \text{ m}$$

Con esto, el perímetro de un nivel sería:

$$\text{Perímetro} \approx 4 \times 43,25 \text{ m} = 173 \text{ m}$$

Si se asume una altura promedio de fachada de 5 metros, el área de cada fachada (una cara) es:

$$\text{Área fachada} \approx 43,25 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 216,25 \text{ m}^2$$

En cuanto al desempeño térmico, los muros exteriores cumplen con los requisitos establecidos en la normativa térmica nacional, específicamente la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)⁹ y la reglamentación térmica aplicable a la **Zona Térmica I**. De acuerdo con dichos requisitos, el valor máximo de transmitancia térmica permitido para muros exteriores es de **0,35 W/m² · K**. Este valor U fue adoptado como referencia para el modelo, considerando que mientras más bajo es el valor U, mejor es el desempeño térmico de la envolvente.

9.2.2. Ventanas

En el caso de las ventanas del edificio CESFAM Coyhaique, no se cuenta con información específica respecto a su número ni a sus dimensiones individuales en la documentación de licitación, sin embargo se hizo una estimación en base a los renderizados que se encontraron, considerando que aproximadamente un **15 %** de la superficie de cada muro exterior corresponde a ventanas. Esta estimación es coherente con edificaciones de uso público en climas fríos y representa una aproximación realista.

En cuanto a las propiedades térmicas de estas ventanas, se adoptó un **valor U de 3,0 W/m² · K**,

⁹De Vivienda y Urbanismo de Chile, [2024](#).

conforme a los límites establecidos por la normativa térmica vigente para la zona. Respecto al **coeficiente de ganancia de calor solar** (SHGC), se utilizó un valor de **0,6**, en concordancia con las orientaciones establecidas en la *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social* del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, 2009) . Este documento destaca la importancia del aprovechamiento solar en fachadas orientadas al norte en zonas frías, recomendando estrategias que favorezcan la captación solar en invierno. El valor asumido representa un balance entre aprovechamiento de ganancias térmicas y control solar, siendo representativo de ventanas con características intermedias en cuanto a captación de energía solar.

Estos parámetros fueron aplicados en la modelación energética del proyecto para representar de manera razonable el comportamiento térmico de los vanos acristalados, contribuyendo a una estimación precisa del balance térmico del edificio.

9.2.3. Puertas

Al igual que en el caso de las ventanas, no se dispone de información específica respecto a la cantidad, ubicación o dimensiones de las puertas exteriores en la documentación del proyecto. Por lo tanto, para efectos de la modelación energética, se asumió que las **puertas representan aproximadamente un 2 % de la superficie de cada muro exterior**.

En cuanto a su desempeño térmico, se adoptó un **valor U de $1,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$** , lo que corresponde a un estándar razonable para puertas metálicas con aislamiento térmico intermedio. Este valor se encuentra dentro de los márgenes permitidos por la **normativa térmica vigente**, aplicada a la zona climática correspondiente al emplazamiento del proyecto. Esta suposición permite mantener la coherencia técnica del modelo energético y asegurar un comportamiento térmico representativo

del caso base.

9.2.4. Techo

Para el análisis de la techumbre del CESFAM se consideró la superficie correspondiente al área de planta del edificio, resultando en una **superficie de cubierta de 1.869 m²**. En cuanto a su desempeño térmico, la cubierta se modeló con un **valor U de 0,25 W/m² · K**, lo que refleja la incorporación de un nivel de aislación acorde a los requisitos normativos para la zona climática del proyecto. Este bajo valor U contribuye a minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior y a mejorar la eficiencia energética global de la envolvente.

9.2.5. Piso

En el caso del piso en contacto con el terreno, se consideró la totalidad de la superficie construida del edificio, correspondiente a **1.869 m²**. Para este elemento se adoptó un **valor U de 0,32 W/m² · K**, representativo de un radier tradicional con aislamiento térmico limitado. Este valor cumple con las referencias normativas aplicables y fue utilizado para modelar las transferencias de calor hacia el terreno, reflejando una condición base común en este tipo de edificaciones.

9.3. Ventilación

Para estimar el caudal total de ventilación requerido en el edificio, se utilizó la fórmula basada en las renovaciones por hora (**ACH, Air Changes per Hour**), que representa la cantidad de veces que el aire interior de un espacio es completamente renovado en una hora:

$$Q = \frac{\text{ACH} \times \text{Volumen}}{3600}$$

En este caso, se asumieron **4 renovaciones por hora**, correspondientes a recintos de baja complejidad según el Reporte de control de contaminantes en Recintos Hospitalarios.¹⁰ El volumen total del edificio se estimó como el producto entre el área construida (3,738 m²) y una altura promedio de 5 metros útiles, resultando en un volumen de 18,690 m³. Sustituyendo en la fórmula:

$$Q = \frac{4 \times 18,690}{3600} \approx 20,770 \text{ L/s}$$

De esta forma, el caudal total requerido es aproximadamente **20.770 L/s**.

A diferencia de otros sistemas que combinan aire recirculado con aire del exterior, en este proyecto se definió que la ventilación se realizará con un **100 % de aire fresco**. Esto implica que la totalidad del caudal corresponde a aire proveniente del exterior, asegurando una renovación completa y continua del aire, lo cual es fundamental en instalaciones de salud.

Respecto a la **eficiencia de recuperación de calor** del sistema, se empleó la fórmula estándar:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \times 100$$

donde T_1 es la temperatura del aire exterior (**5°C**, correspondiente al promedio en Coyhaique), T_2 es la temperatura del aire impulsado tras pasar por el recuperador (**18°C**, valor típico informado

¹⁰NT-112: Ventilación como Método de Control de Contaminantes en Recintos Hospitalarios (actualización NT-43), 2016.

en sistemas de recuperación para climas fríos según el *HVAC Applications Handbook* ASHRAE, 2019), y T_3 es la temperatura del aire interior extraído (**22°C**). Reemplazando:

$$\eta = \frac{18 - 5}{22 - 5} \times 100 = \frac{13}{17} \times 100 \approx 76,5 \%$$

La eficiencia térmica de recuperación del sistema es entonces del orden de **76,5 %**.

Finalmente, se estimó la cantidad de unidades de ventilación necesarias. No obstante, debido a la decisión de utilizar un **sistema único centralizado** capaz de cubrir el flujo completo de aire requerido (20,770 L/s), se optó por la implementación de **una sola unidad de ventilación** de capacidad total, optimizando así el control y la operación del sistema.

9.4. Luminarias

Para el análisis del sistema de iluminación del CESFAM se utilizó como fuente principal la *Memoria de Cálculo de Iluminación* entregada en la documentación de licitación del proyecto (DIALUX, 2025) . A partir de dicho documento, se identificó el área total de piso a iluminar como **3.738 m²**, correspondiente a la superficie construida total del establecimiento divididas en dos pisos.

En la documentación técnica se presentan múltiples modelos de luminarias utilizadas en distintos espacios del edificio. Sin embargo, para efectos del presente análisis energético, se adoptó un criterio de simplificación seleccionando el modelo de mayor recurrencia, determinado en función del uso en recintos estándar. Específicamente, se tomó como referencia una sala de podología de **16,67 m²** que utiliza **4 luminarias**, lo cual representa una proporción de una luminaria cada

4,17 m². A partir de esta relación, se estimó un total de **897 luminarias** para cubrir la totalidad del recinto.

El modelo considerado corresponde a una luminaria LED de **27,7 W** de potencia unitaria y **3.699 lm** de flujo luminoso. Con estas características y el total de luminarias estimado, se obtiene una **carga de iluminación promedio de 6,65 W/m²**, valor representativo del consumo del sistema de iluminación del CESFAM.

El sistema fue modelado bajo un régimen de **operación continua de 24 horas al día, los 7 días de la semana (24/7)**, en coherencia con el funcionamiento permanente del centro de salud.

9.5. Equipos eléctricos

En la etapa de modelación energética se consideraron dos tipos principales de equipos eléctricos presentes en el CESFAM. No se cuenta con información específica ni inventarios detallados de todos los artefactos que se instalarán en el edificio; por ello, para efectos de este análisis se realizó una clasificación genérica basada en el tipo de equipos típicos de uso continuo en recintos de salud de similares características, permitiendo así estimar la carga eléctrica de manera representativa.

9.5.1. Equipos generales

Los equipos generales corresponden a artefactos de uso permanente en áreas clínicas y administrativas, los cuales operarán bajo un régimen de **24 horas al día, los 7 días de la semana**. Para esta categoría se estimó una **carga instalada de 30.000 W**, aplicando un **ciclo de utilización del 80 %**, lo que refleja que no todos los equipos operan simultáneamente a plena capacidad. A continuación se presenta un desglose representativo de dicha carga:

Tabla 9.1: Distribución estimada de carga de equipos generales

Categoría	Potencia total (W)
Computadores y periféricos	12.000
Equipos clínicos menores	15.000
Otros (cargadores, impresoras)	3.000
Total	30.000

9.5.2. Refrigeración

Además de los equipos generales, se considera un grupo de **equipos de refrigeración** destinados a mantener vacunas, muestras y medicamentos en condiciones controladas. Estos equipos se caracterizan por un funcionamiento continuo para preservar la cadena de frío, por lo que se asignó una **carga eléctrica de 6.000 W** con un **ciclo de utilización del 100 %**, reflejando que deben permanecer encendidos de manera permanente para garantizar la correcta conservación de los insumos críticos.

9.6. Agua caliente sanitaria

Para el análisis del consumo de agua caliente sanitaria en el CESFAM, se selecciona como referencia el perfil de uso de un edificio tipo **hospital**. En este tipo de configuración, el consumo se basa en la ocupación equivalente en camas hospitalarias, por lo que se asumió una capacidad de **200 camas** como valor base, representativo del flujo estimado de usuarios en el centro de salud.

Se consideró una **tasa de ocupación promedio del 90 %**, lo que generó un **uso diario estimado de 35.431 litros de agua caliente**. La **temperatura objetivo del agua caliente se fijó en 60 °C**, valor establecido por la normativa sanitaria vigente para establecimientos de atención cerrada¹¹. El sistema se modeló bajo un régimen de **operación continua de 24 horas al día**, en línea con el funcionamiento permanente del CESFAM.

Asimismo, se incorporó una **eficiencia de recuperación de calor del 85 %**, en base a valores típicos alcanzables por sistemas de ventilación con recuperación de calor en instalaciones hospitalarias, según referencias técnicas de eficiencia energética¹². La **producción de calor para el sistema de agua sanitaria** se encuentra integrada al sistema central, utilizando las **calderas a diésel** ya descritas en los apartados anteriores.

9.7. Bombas

El sistema hidráulico del CESFAM considera el uso de **dos bombas principales**, una para cada piso del edificio, destinadas a cubrir las necesidades de circulación de agua en los sistemas térmicos y sanitarios. La información técnica utilizada para este apartado fue extraída del *Informe de Eficiencia Energética* entregado en la licitación del proyecto Consultores Proyecto CESFAM, 2017.

Cada bomba se proyectó con una **capacidad de 5 kW** y un **motor de eficiencia estándar**, estimándose una **eficiencia del 80 %** para el motor y un **factor de carga del 75 %**, lo que representa condiciones típicas de operación continua en instalaciones institucionales. Por su parte, se considera que cada bomba presenta una **eficiencia hidráulica del 70 %** y opera bajo un

¹¹ Norma Técnica Básica de Autorización Sanitaria para Establecimientos de Salud de Atención Cerrada, 2013.

¹² Canales, 2020.

régimen de flujo constante.

El sistema fue modelado para una **operación de 24 horas al día**, coherente con el funcionamiento permanente del recinto. Estos parámetros permiten calcular de manera representativa la demanda energética asociada a los sistemas de impulsión de agua del edificio.

9.8. Emisiones de gases de efecto invernadero

Para estimar el **factor de emisión de gases de efecto invernadero (GEI)** del sistema eléctrico en Coyhaique, se utilizó como base la información disponible en el sitio web oficial del programa *Comuna Energética* del Ministerio de Energía de Chile. En dicho portal se indica que el consumo energético anual de la comuna alcanza los **70 GWh**, con una emisión total de aproximadamente **17.500 toneladas de CO₂** equivalente por año¹³. A partir de estos datos, se calculó el factor de emisión dividiendo las emisiones anuales por el consumo energético total, obteniendo así un valor de:

$$\text{Factor de emisión} = \frac{17,500,000 \text{ kgCO}_2}{70,000,000 \text{ kWh}} = 0,25 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

Este valor representa la intensidad de carbono promedio asociada al consumo eléctrico en Coyhaique, considerando su matriz energética local y el uso de fuentes fósiles en generación distribuida.

Adicionalmente, se consideró una **pérdida por transmisión y distribución eléctrica del 6,5 %**, valor basado en estadísticas de la *International Energy Agency (IEA)*, que reporta

¹³Ministerio de Energía de Chile, 2023b.

promedios similares para Chile en los últimos años¹⁴. Este porcentaje permite ajustar el consumo eléctrico final para representar de forma más precisa la energía efectivamente disponible en los puntos de uso.

9.9. Análisis Caso Base

El caso base desarrollado para el CESFAM se construyó a partir de la información técnica entregada en la licitación del proyecto, incluyendo el *Informe de Eficiencia Energética*¹⁵ y la *Memoria de Cálculo de Iluminación*¹⁶, así como de los requisitos normativos establecidos por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y normativa térmica vigente. En aquellos puntos donde no se contaba con especificaciones detalladas, se adoptaron supuestos conservadores basados en valores típicos de diseño para recintos de salud, permitiendo así generar una modelación energética representativa de la operación real del edificio.

A partir del proceso de modelación energética, se estimó tanto la **demanda energética anual** como el **consumo de combustible o energía final** por ítem del edificio CESFAM Coyhaique. Esta distinción es relevante para evaluar la eficiencia de los sistemas y cuantificar adecuadamente los impactos ambientales y económicos del proyecto.

La **envolvente del edificio** presenta una demanda energética de **743.038 kWh** y un consumo de combustible asociado de **928.798 kWh**, debido al rendimiento térmico del sistema de calefacción. El sistema de **ventilación** tiene una demanda de **1.136.375 kWh**, con un consumo eléctrico real de **1.420.469 kWh**. En el caso de las **luminarias**, la demanda y el consumo coinciden en **217.753 kWh**, dado que se trata de una carga eléctrica directa sin pérdidas intermedias

¹⁴Agency, 2023.

¹⁵Consultores Proyecto CESFAM, 2017.

¹⁶DIALUX, 2025.

significativas. Para los **equipos eléctricos**, el consumo también corresponde directamente a la demanda: **262.800 kWh**. El sistema de **agua caliente sanitaria** tiene una demanda de **126.484 kWh**, y un consumo térmico equivalente a **158.105 kWh**, reflejando las pérdidas térmicas del proceso de calentamiento. Finalmente, el sistema de **bombas** presenta un consumo total de **82.125 kWh**, coincidente con su demanda, al ser también una carga eléctrica directa.

En el caso base del proyecto, que corresponde al escenario sin implementación de medidas de eficiencia energética ni energías renovables, se estimó un total de **784 toneladas de dióxido de carbono (CO₂)** emitidas anualmente como resultado del consumo energético del CESFAM Coyhaique. Esta cifra considera tanto el uso de combustibles fósiles como electricidad de la red, aplicando factores de emisión correspondientes a cada fuente energética. Las emisiones calculadas constituyen una línea base fundamental para evaluar el impacto ambiental del proyecto y cuantificar los beneficios esperados de posibles medidas de mitigación en escenarios mejorados.

Tabla 9.2: Demanda energética vs. consumo de combustible por ítem - Caso base CESFAM

Ítem	Demanda (kWh)	Consumo (kWh)
Envolvente del edificio	743.038	928.798
Ventilación	1.136.375	1.420.469
Luminarias	217.753	217.753
Equipos eléctricos	262.800	262.800
Agua caliente sanitaria	126.484	158.105
Bombas	82.125	82.125

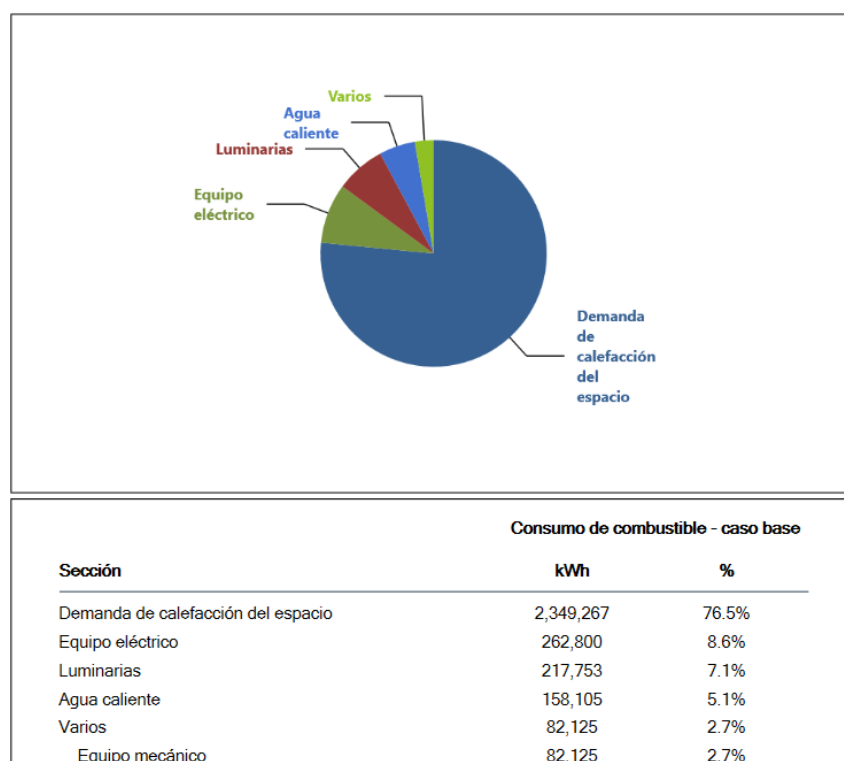


Figura 9.1: Distribución del consumo energético del CESFAM en el caso base. Se observa que la calefacción representa la mayor parte del consumo energético, seguida por el uso de equipos eléctricos. Fuente: RETScreen.

En términos de costos de operación, el caso base considera tanto el consumo de combustible diésel para la generación térmica como el consumo eléctrico para el funcionamiento de los distintos sistemas del CESFAM. A partir de la modelación energética realizada, se estimó un **consumo total de combustible diésel de 235.680 litros anuales**, lo que representa un gasto aproximado de **276.923.881 CLP**. Por otra parte, el **consumo de electricidad** asociado a iluminación, ventilación, equipos eléctricos, bombas y otros sistemas alcanza los **562.768 kWh anuales**, que se traducen en un costo aproximado de **92.340.035 CLP**. Sumando ambos ítems energéticos, se obtiene un **costo total de operación anual de 369.263.916 CLP** para el edificio en su configuración base.

10. Caso Propuesto I: Implementación de Caldera de Biomasa y Paneles Fotovoltaicos

10.1. Cambio de caldera

Las calderas de biomasa que utilizan pellets representan una alternativa sustentable y eficiente para la calefacción. Los pellets, fabricados a partir de aserrín prensado con bajo contenido de humedad, tienen un alto poder calorífico y permiten una combustión limpia, con reducidas emisiones de material particulado. Gracias a su automatización, estos sistemas funcionan con alta eficiencia (hasta un 95 %), emitiendo menos del 10 % de lo que emite un calefactor a leña tradicional (del Medio Ambiente de Chile, 2023a). Además, al ser un biocombustible neutro en carbono, su uso contribuye significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero.

El Estado chileno ha impulsado programas de recambio de calefactores a leña por equipos a pellets en diversas regiones del país, como Temuco, Coyhaique y Talca, promoviendo tecnologías más limpias y compatibles con la normativa de emisiones MP 2,5. Estas políticas públicas, junto con el menor costo de operación y la disponibilidad creciente del pellet, han permitido consolidar esta fuente de energía como una solución accesible, eficiente y respetuosa con el medio ambiente (del Medio Ambiente de Chile, 2023b).

Para satisfacer la demanda térmica total del CESFAM, correspondiente al consumo actual de calefacción del edificio, se propone la implementación de un sistema de generación térmica basado en **biomasa sólida**, específicamente mediante **pellet de madera**. En particular, se contempla la instalación de **dos calderas modelo UNICLIMA GRA**, una de **250 kW** (Uniclimate, 2025b) y otra de **115 kW** (Uniclimate, 2025a) de potencia térmica nominal, alcanzando así una capacidad

instalada total de **365 kW**. Esta potencia supera a la carga térmica requerida para calefacción y agua caliente sanitaria de aproximadamente **286 kW**, permitiendo cubrir el 100 % de las necesidades del edificio con un pequeño margen operativo para variaciones de carga estacional o de mantenimiento.

Las calderas UNICLIMA GRA están diseñadas para uso intensivo en edificaciones institucionales y comerciales. Cuentan con sistema de alimentación automática de combustible, encendido electrónico, limpieza automatizada del intercambiador y un panel de control digital que permite la modulación de potencia, garantizando una operación eficiente y segura. Además, estas calderas están certificadas para cumplir con normas de bajas emisiones de material particulado y una eficiencia energética del **90 %** aproximadamente.

El combustible seleccionado para el funcionamiento de las calderas del caso propuesto será **pellet de madera**, una biomasa sólida ampliamente utilizada en sistemas térmicos por su alto poder calorífico y bajo impacto ambiental. Este tipo de biocombustible se caracteriza por tener un **poder calorífico inferior (PCI) cercano a los 4,9 kWh/kg**, un bajo contenido de humedad (generalmente inferior al 10 %) y un reducido nivel de emisión de cenizas, lo que garantiza un buen desempeño energético y una menor frecuencia de mantenimiento. Además, los pellets presentan ventajas significativas frente a combustibles fósiles, ya que emiten menores cantidades de gases contaminantes como SO_x , NO_x y material particulado fino. El precio de mercado estimado de este combustible es de **\$444 CLP por kilogramo**, lo que lo convierte en una alternativa económicamente viable y competitiva para sistemas de calefacción institucionales.

En términos de inversión, el costo de adquisición de la **caldera UNICLIMA GRA 250 kW** es de aproximadamente **\$41.974.571 CLP**, mientras que la **caldera UNICLIMA GRA 115 kW** tiene un valor estimado de **\$24.444.441 CLP**, lo que implica una inversión total de

\$66.419.012 CLP solamente en equipos.



Figura 10.1: Imagen referencias de la Caldera de Pellet

10.2. Implementación de sistema fotovoltaico

La incorporación de sistemas fotovoltaicos en edificaciones públicas como centros de salud constituye una estrategia fundamental para avanzar hacia la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental. La energía solar, al ser una fuente limpia, renovable e inagotable, permite reducir de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la autonomía energética y disminuir los costos operacionales en el largo plazo. En el contexto del presente proyecto, se propone cubrir la mitad del techo del CESFAM, correspondiente a una superficie de 934,5 m², mediante la instalación de 445 módulos fotovoltaicos modelo LONGi LR4-72HPH¹⁷, distribuidos en 15 pallets.

¹⁷LONGi, 2022.

Estos módulos poseen una eficiencia de conversión del 20,5 %, lo que permite una alta densidad de generación eléctrica en relación al área disponible. La capacidad instalada del sistema será de aproximadamente 350 kW, con una eficiencia de inversión del 97 %, lo que refleja un adecuado aprovechamiento de la inversión realizada en términos de energía útil generada. La inclinación óptima de los paneles se estableció en 33°, valor que fue determinado mediante un proceso iterativo de simulaciones energéticas, evaluando distintas configuraciones en función del ángulo de inclinación y la trayectoria solar. En cuanto al modelamiento del sistema fotovoltaico, se ha considerado un **factor de ajuste bifacial del 0 %**, dado que los módulos seleccionados son de tipo monofacial, por lo que no cuentan con la capacidad de aprovechar la radiación reflejada desde la parte posterior del panel. Por lo tanto, no se genera ningún aporte energético adicional por efecto bifacial, y se omite esta variable del análisis. Asimismo, se ha asumido un valor de **pérdidas varias igual a 0 %**, ya que el presente estudio tiene como objetivo estimar el potencial máximo teórico de generación bajo condiciones ideales.

Con esta configuración, el sistema fotovoltaico será capaz de generar anualmente 268.232 kWh de energía eléctrica, lo que representa un factor de planta del 16 %. Esta cantidad de energía contribuirá significativamente a satisfacer la demanda eléctrica del edificio, especialmente en horarios diurnos, reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional y, por consiguiente, los costos asociados. Además, se generará un impacto ambiental positivo al evitar la quema de combustibles fósiles o leña, mejorando la calidad del aire local y disminuyendo la huella de carbono institucional.

Tabla 10.1: Radiación solar diaria inclinada y generación mensual de electricidad. Fuente: Restscreen

Mes	Radiación solar diaria con inclinación de panel (kWh/m ² /d)	Generación de electricidad (kWh)
Enero	5.81	33,005.315
Febrero	5.50	28,120.953
Marzo	4.31	24,764.418
Abril	3.12	17,641.134
Mayo	1.92	11,484.536
Junio	1.55	9,375.451
Julio	1.99	12,003.091
Agosto	2.83	16,892.285
Septiembre	3.94	22,384.078
Octubre	4.93	28,589.314
Noviembre	5.58	31,089.766
Diciembre	5.86	33,493.055
Anual	3.94	268,531.859

Desde el punto de vista económico, el costo total estimado del sistema asciende a aproximadamente \$90.735.300 CLP. Esta inversión inicial se justifica plenamente considerando la durabilidad del sistema, el bajo costo de mantenimiento, y los beneficios ambientales y operacionales asociados. La instalación de este sistema no solo permite aprovechar el recurso solar disponible de manera eficiente, sino que también actúa como medida ejemplar de política pública energética, aportando al cumplimiento de metas nacionales e institucionales de descarbonización y eficiencia energética.

En conjunto, esta solución representa una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para mejorar el desempeño energético del CESFAM.

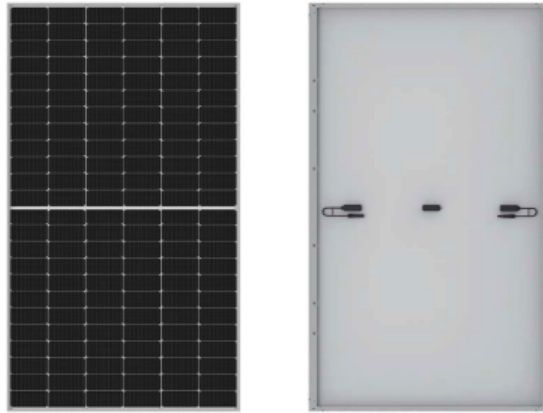


Figura 10.2: Referencia Panel implementado

10.3. Análisis Caso propuesto I

El caso propuesto para el CESFAM Coyhaique contempla la incorporación de dos medidas principales de mejora energética: por un lado, la implementación de un sistema de generación fotovoltaica en la cubierta del edificio; y por otro, la sustitución del sistema de calefacción basado en diésel por una caldera de biomasa que utiliza pellet como combustible. Estas medidas fueron seleccionadas por su viabilidad técnica, su compatibilidad con las condiciones del edificio y su alto impacto en la reducción del consumo energético y las emisiones contaminantes. Como resultado de estas modificaciones, se reconfigura el consumo de energía asociado a la climatización del recinto. En términos de demanda térmica, el consumo estimado para calentamiento de espacios a través de la envolvente será de 825.598 kWh anuales, mientras que el sistema de ventilación requerirá 1.262.639 kWh y el sistema de agua caliente sanitaria 140.538 kWh, sumando un total de 2.228.775 kWh de energía térmica anual. Esta demanda será abastecida mediante la caldera de

biomasa, que gracias a su alta eficiencia del 90 % permite un aprovechamiento óptimo del pellet, traduciéndose en un consumo anual de 406 toneladas, con un costo asociado de **\$180.293.193 CLP**.

Por otro lado, la incorporación del sistema fotovoltaico permite una importante reducción del consumo de electricidad desde la red, aportando una generación estimada de 268.532 kWh anuales. Esto permite reducir el consumo eléctrico total desde los 562.768 kWh del escenario base a solo 294.147 kWh en el caso propuesto, con un gasto correspondiente de **\$48.271.809 CLP** anuales. En conjunto, el gasto energético total del edificio asciende a **\$228.562.002 CLP** en el nuevo escenario, lo que representa una mejora significativa respecto al caso base, tanto en términos económicos como ambientales. En el escenario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) propuesto estas se reducen a solo **93,3 toneladas anuales**, gracias al uso de una fuente térmica considerada carbono-neutra como la biomasa y a la incorporación de energía solar sin emisiones directas. Estas reducciones reflejan no solo un cambio en la matriz energética del CESFAM, sino también un compromiso con la sostenibilidad, la eficiencia operativa y el cumplimiento de los objetivos de descarbonización establecidos a nivel nacional.

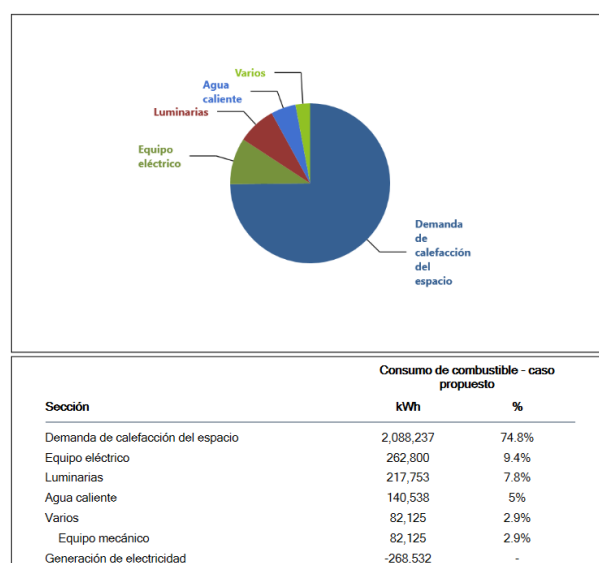


Figura 10.3: Análisis Caso propuesto. Fuente: Retscreen

10.4. Comparación Resultados: Caso Base y Caso Propuesto I

En términos económicos, el caso propuesto representa una mejora significativa respecto al escenario base. Mientras que el CESFAM Coyhaique presenta un gasto energético total de **\$369.263.916 CLP** en el caso base, dicho valor se reduce a **\$228.565.002 CLP** bajo el nuevo escenario. Esta diferencia se explica, principalmente, por la eliminación total del uso de diésel como fuente de calefacción, siendo reemplazado por biomasa en forma de pellet. En el caso propuesto, se contempla un consumo de **406 toneladas de pellet** al año, complementado con **294.147 kWh de electricidad**, lo que corresponde al consumo neto luego de descontar los **268.532 kWh** generados anualmente por el sistema fotovoltaico.

La reducción total en términos monetarios asciende a **\$140.698.914 CLP**, lo que representa una disminución del **38.1 %** en el gasto energético anual del establecimiento. Este ahorro se logra sin comprometer las condiciones térmicas ni operativas del CESFAM, gracias a la eficiencia del sistema de calefacción propuesto (90 %) y a la generación propia de energía eléctrica. En este sentido, el cambio no solo implica una mejora económica significativa, sino también una transformación estructural de la matriz energética del edificio, avanzando hacia fuentes limpias, locales y sostenibles.

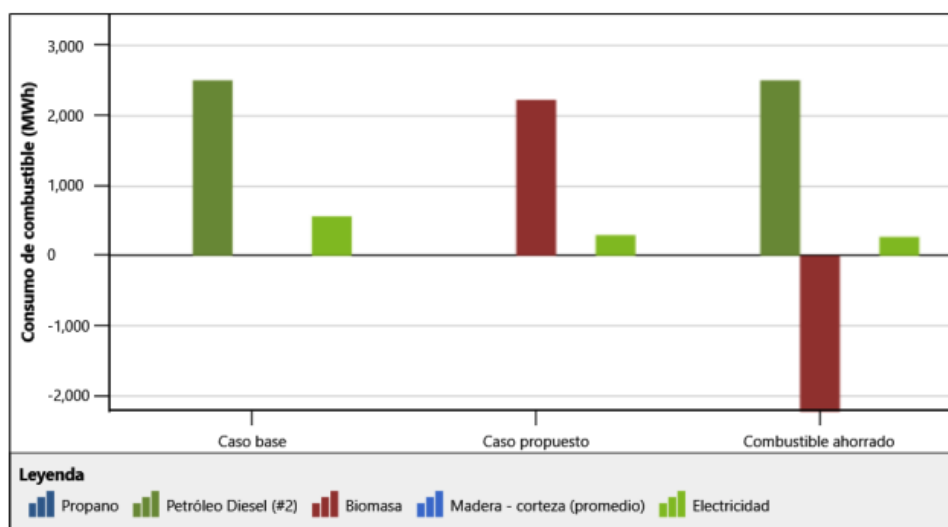


Figura 10.4: Tabla comparativa de consumos en Caso base y Caso propuesto. Fuente: Retscreen

Además del impacto económico, las medidas propuestas tienen un efecto altamente positivo en términos ambientales, particularmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el escenario base, el CESFAM Coyhaique presenta una generación anual de **784 toneladas de CO₂**, resultado del uso intensivo de diésel y electricidad proveniente de la red. Con la implementación de la caldera de biomasa y el sistema fotovoltaico, las emisiones se reducen drásticamente a solo **93,3 toneladas anuales**, lo que representa una disminución bruta de **691 toneladas de CO₂ al año**, equivalente a una reducción del **88,1 %**. Esta mejora es especialmente relevante considerando que Coyhaique es una de las ciudades con mayores niveles de contaminación atmosférica en el país, por lo que toda acción orientada a disminuir las emisiones locales tiene un valor ambiental y social significativo.

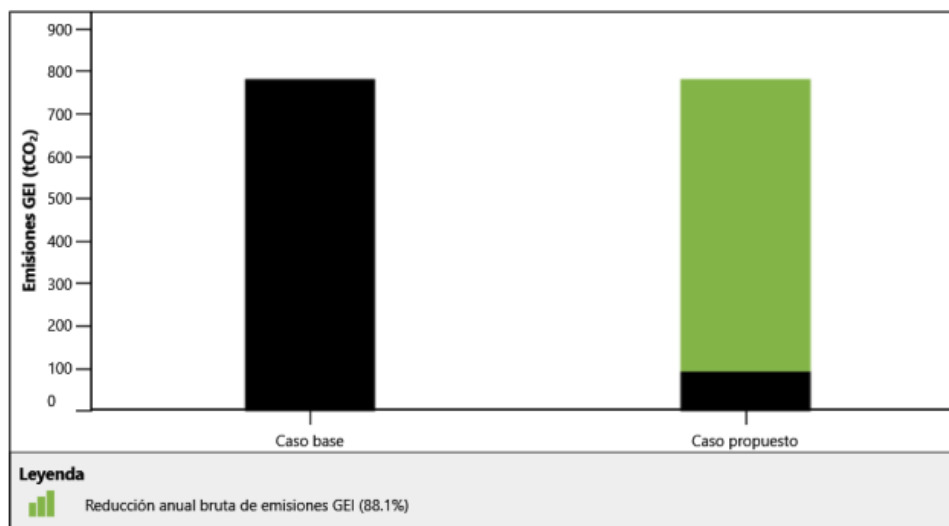


Figura 10.5: Tabla comparativa de emisiones de GEI Caso Propuesto I. Fuente: Retscreen

10.4.1. Resultados Financieros

Desde una perspectiva financiera, el caso propuesto presenta indicadores altamente favorables que respaldan su viabilidad económica. Se ha considerado una tasa de inflación anual del **4,3 %**, en concordancia con las proyecciones del Banco Central de Chile, y una vida útil del proyecto estimada en **15 años**. Asimismo, se ha definido una relación con la deuda del **0 %**, asumiendo que la inversión será financiada completamente con capital propio, lo cual elimina el riesgo financiero asociado al endeudamiento. La inversión inicial total requerida para la implementación del proyecto asciende a **\$157.154.312 CLP**, valor que incluye tanto el costo de adquisición e instalación de las calderas de biomasa como la implementación del sistema fotovoltaico.

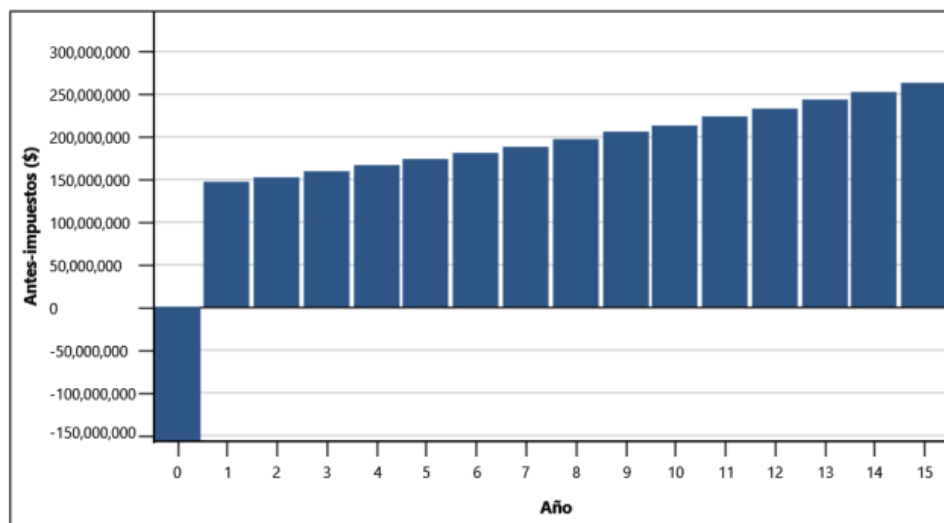


Figura 10.6: Flujo de efectivo anual. Fuente: Retscreen

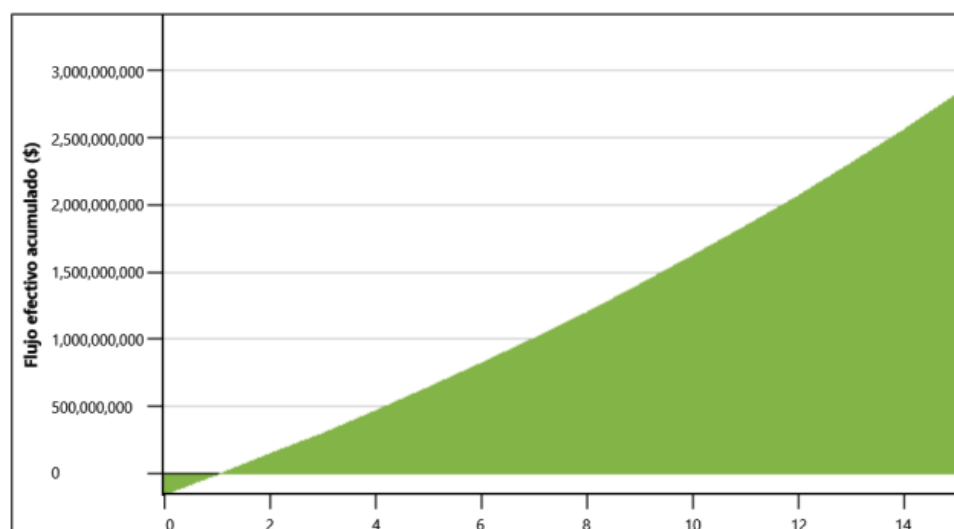


Figura 10.7: Flujo de Caja acumulado. Fuente : Retscreen.

En cuanto a los costos operacionales del nuevo escenario, se considera un gasto anual de **\$228.565.002 CLP**, correspondiente al consumo de pellet y electricidad residual. A su vez, los ingresos y ahorros generados por el proyecto —producto del reemplazo del sistema de calefacción a diésel y la autogeneración de energía— alcanzan los **\$369.263.916 CLP** anuales. Como resultado de esta configuración, se obtiene una **Tasa Interna de Retorno (TIR) antes de impuestos**

de activos del 97 %, lo que indica una rentabilidad excepcional. Además, el período simple de recuperación del capital se sitúa en tan solo **1,1 años**, lo cual también coincide con el repago del capital, lo que evidencia una rápida recuperación de la inversión inicial. En conjunto, estos indicadores financieros posicionan al proyecto como altamente rentable, con retornos rápidos y sostenidos, y con un perfil de riesgo muy bajo, lo cual lo convierte en una inversión atractiva desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

Por otro lado, al realizar el análisis financiero del proyecto con una tasa de descuento del 15 %, se obtiene un **Valor Actual Neto (VAN) de \$931.969.050 CLP**. Este resultado es altamente favorable, ya que indica que los beneficios económicos descontados del proyecto superan con creces la inversión inicial. En otras palabras, el proyecto no solo recupera su inversión, sino que además genera un excedente significativo, lo cual respalda su viabilidad económica y convierte su implementación en una decisión financieramente sólida.

10.4.2. Análisis de Sensibilidad y Riesgo

Para evaluar la solidez financiera del proyecto frente a la incertidumbre en variables clave, se llevó a cabo un análisis de riesgo mediante simulación de Monte Carlo en RETScreen. El análisis se centró en la **Tasa Interna de Retorno (TIR) antes de impuestos - activos**, utilizando un total de **4000 combinaciones aleatorias** de parámetros dentro de rangos definidos. Esta metodología permite observar cómo varía la rentabilidad del proyecto ante fluctuaciones simultáneas en costos iniciales y operacionales, permitiendo así una estimación más realista del desempeño económico del sistema propuesto.

Los tres parámetros considerados con incertidumbre fueron: los **costos iniciales** del proyecto (\$157.154.312), el **costo anual del combustible en el caso propuesto** (\$228.565.002, co-

rrespondiente al pellet y electricidad residual), y el **costo del combustible en el caso base** (\$369.263.916). A cada uno de estos parámetros se le aplicó una variabilidad del $\pm 50\%$, lo cual define rangos amplios de posibles escenarios. Por ejemplo, los costos iniciales fluctuaron entre un mínimo de \$78.577.156 y un máximo de \$235.731.468; el costo del combustible en el caso propuesto varió entre \$114.282.501 y \$342.847.503; mientras que el costo del combustible del caso base se situó entre \$184.631.958 y \$553.895.874.

El análisis arrojó resultados muy sólidos desde el punto de vista de la rentabilidad del proyecto. La **mediana de la TIR resultante fue de 100 %**, lo que implica que la mitad de las simulaciones arrojaron una TIR igual o superior a ese valor. Este dato es especialmente significativo, ya que reafirma la solidez económica del proyecto aún bajo condiciones de incertidumbre. El **nivel de riesgo del proyecto** se mantuvo en 50 %, lo cual indica que en la mitad de los escenarios simulados, la TIR fue inferior al valor de referencia; sin embargo, esto no implica un nivel alto de riesgo si se considera que incluso los valores bajos de TIR siguen siendo favorables.

En cuanto a la dispersión de resultados, el **intervalo de confianza** calculado para la TIR mostró límites bastante estrechos en términos absolutos, pero consistentes en cuanto a rentabilidad. El **mínimo del intervalo de confianza fue de 68,2 %**, lo cual significa que incluso en los escenarios menos favorables —donde los costos aumentan y los ahorros disminuyen dentro del rango definido—, el proyecto sigue siendo altamente rentable. Por su parte, el **máximo del intervalo alcanzó el 134 %**, lo que representa un desempeño excepcional en escenarios favorables, donde los costos son menores y los ahorros mayores.

En resumen, el análisis de riesgo demuestra que el proyecto no solo es rentable bajo condiciones normales, sino que también mantiene su atractivo financiero en presencia de variaciones significativas en sus principales parámetros económicos. La estabilidad de la TIR en todos los escenarios

simulados refleja una **robustez estructural del proyecto** frente a incertidumbre y confirma su viabilidad como una inversión sustentable, tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

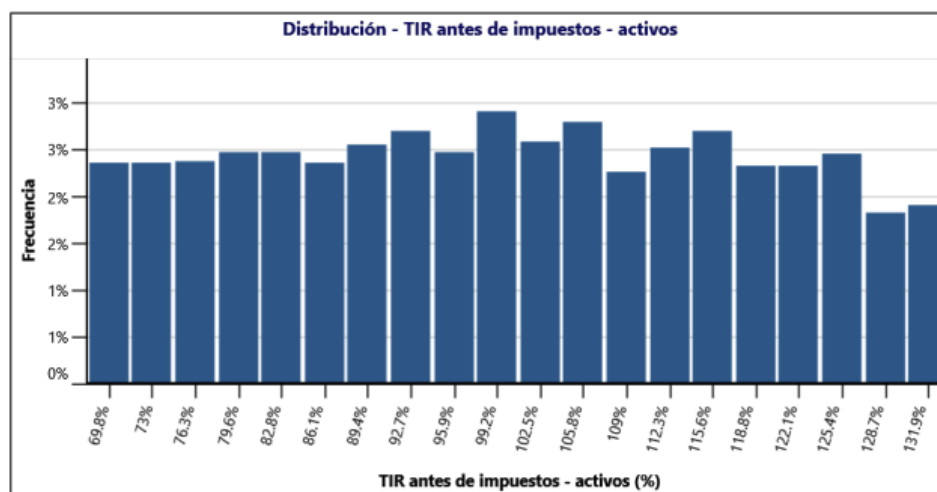


Figura 10.8: Distribución TIR antes de impuestos Caso Propuesto I. Fuente: Retscreen

Una de las mayores fortalezas del caso propuesto radica en el bajo costo del combustible utilizado, en este caso, el pellet. Este combustible no solo presenta un precio altamente competitivo en el mercado nacional, sino que además posee un excelente rendimiento energético, lo que permite que el proyecto supere con creces los resultados del caso base tanto en términos económicos como ambientales. No obstante, es importante considerar que esta ventaja podría verse comprometida ante posibles fluctuaciones o aumentos significativos en el precio del pellet. En escenarios de encarecimiento sostenido, la rentabilidad del proyecto podría disminuir considerablemente, llegando incluso a generar pérdidas en el largo plazo. Por ello, esta variable debe ser cuidadosamente analizada y monitoreada en la toma de decisiones, especialmente en el contexto de proyectos públicos que buscan asegurar eficiencia y estabilidad presupuestaria en el tiempo.

11. Caso Propuesto II: Implmentación de caldera eléctrica y paneles fotovoltaicos

11.1. Cambio de Caldera

Las calderas eléctricas son sistemas de generación de calor que funcionan mediante resistencias eléctricas sumergidas en agua, las cuales convierten la energía eléctrica en energía térmica de forma directa. A diferencia de las calderas convencionales que utilizan combustibles fósiles como el diésel o el gas, las calderas eléctricas no requieren de procesos de combustión, lo que se traduce en una operación limpia, silenciosa y sin emisiones contaminantes locales. Entre sus principales ventajas se destacan su alta eficiencia energética, su bajo mantenimiento debido a la ausencia de partes móviles y quemadores, y su facilidad de instalación, ya que no requieren chimeneas ni redes de ventilación. Además, permiten una regulación precisa de la temperatura y pueden integrarse fácilmente a sistemas de calefacción por agua existentes. Estas características las convierten en una alternativa atractiva para edificaciones institucionales o residenciales que buscan soluciones térmicas sostenibles, especialmente en contextos donde se dispone de electricidad a precios competitivos o se complementan con generación fotovoltaica.

Para la presente propuesta se contempla la implementación de un sistema de calefacción compuesto por **calderas eléctricas de 54 kW de potencia nominal** modelo TEI30036 marca TERMIC¹⁸, con una eficiencia térmica del **95 %**. Estas unidades fueron seleccionadas por su compatibilidad con operación continua, su eficiencia elevada y su facilidad de integración con sistemas térmicos existentes. La demanda térmica anual del recinto asciende a 2.507.372 kWh, lo que equivale a una potencia promedio requerida de aproximadamente 286 kW si se considera funcionamiento durante

¹⁸ «Caldera / Termo Eléctrico Industrial de 300 litros 54 kW», 2025.

las 8.760 horas del año. En base a ello, se requiere la instalación de **seis calderas eléctricas**, lo que proporciona una potencia instalada total de 324 kW, satisfaciendo la potencia necesaria. Este nuevo sistema reemplazará al antiguo sistema de calefacción a diésel, eliminando por completo el uso de combustibles fósiles para calefacción y, en consecuencia, reduciendo significativamente las emisiones locales de gases contaminantes y los riesgos operacionales asociados al almacenamiento de combustibles líquidos.

Cada una de estas calderas tiene un valor unitario de **\$5.469.900 CLP**, por lo que la inversión total en equipamiento térmico asciende a **\$32.819.400 CLP**. Esta solución no solo garantiza un funcionamiento limpio, silencioso y estable, sino que también permite una regulación más precisa de la temperatura y menores requerimientos de mantenimiento en comparación con sistemas de combustión. La eficiencia térmica del 95 % asegura que casi la totalidad de la energía eléctrica consumida se transforma en energía útil, lo cual mejora la relación costo-beneficio del sistema y refuerza el compromiso del establecimiento con la sostenibilidad energética.



Figura 11.1: Imagen referencial de las calderas electricas a implementar

11.2. Implementación de sistema fotovoltaico

En esta nueva propuesta, se plantea una ampliación significativa del sistema fotovoltaico originalmente considerado. Mientras que en la primera alternativa se proponía cubrir únicamente la mitad de la superficie disponible en la techumbre del edificio, en el presente caso se opta por aprovechar al máximo el potencial solar del recinto mediante la instalación de paneles fotovoltaicos sobre la totalidad del techo. Esto implica una superficie cubierta de **1.869 m²**, duplicando el área útil para captación solar respecto a la propuesta anterior.

Para cubrir dicha superficie, se proyecta la instalación de un total de **861 paneles fotovoltaicos**, lo que permitirá una mayor generación de energía eléctrica renovable, reduciendo significativamente la dependencia de la red eléctrica y mejorando el perfil de autoconsumo del CESFAM. La inversión estimada para esta ampliación asciende a **\$175.421.580 CLP**, lo que representa una solución estratégica orientada a la sostenibilidad energética, con beneficios tanto económicos como ambientales en el mediano y largo plazo.

11.3. Análisis Caso propuesto II

En el caso propuesto, el sistema de climatización del CESFAM pasa a operar exclusivamente con electricidad, prescindiendo completamente de combustibles fósiles o biomasa. Esto implica una transformación significativa del perfil de consumo energético, en donde el consumo total de energía eléctrica asciende a **2.137.709 kWh anuales**, con un costo asociado de **\$350.815.173 CLP**. Esta cifra considera también una importante contribución del sistema fotovoltaico, el cual genera un ahorro energético estimado de **536.441 kWh por año**, lo que permite mitigar parte del gasto eléctrico y reduce la exposición del recinto a las variaciones tarifarias del mercado regulado.

Adicionalmente, gracias a la implementación de calderas eléctricas de alta eficiencia (95 %), se logra una reducción en el consumo energético destinado a calefacción de aproximadamente **15,8 %**, en comparación con el escenario anterior basado en combustión. Esta mejora en eficiencia térmica se traduce en un menor requerimiento energético para satisfacer la misma demanda de confort, reforzando los beneficios técnicos y económicos del proyecto. No obstante, dado que la totalidad del sistema energético pasa a depender de la red eléctrica, se proyecta una **emisión total de gases de efecto invernadero equivalente a 572 toneladas de CO₂ anuales**, cifra que refleja la huella de carbono asociada a la matriz energética nacional y que debe ser considerada en los análisis ambientales del proyecto.

11.4. Comparación Resultados: Caso Base y Caso Propuesto II

Al comparar el escenario base con el caso propuesto, se evidencia una mejora significativa tanto en términos económicos como ambientales. En el escenario base, el gasto anual asociado al consumo energético ascendía a **\$369.263.916 CLP**, mientras que en el nuevo escenario el gasto disminuye a **\$350.815.173 CLP**, considerando un consumo total de **2.137.709 kWh**. Esta optimización se traduce en un **ahorro anual de \$18.448.743 CLP**, lo que representa una mejora directa en la eficiencia operativa del establecimiento sin comprometer el confort térmico.

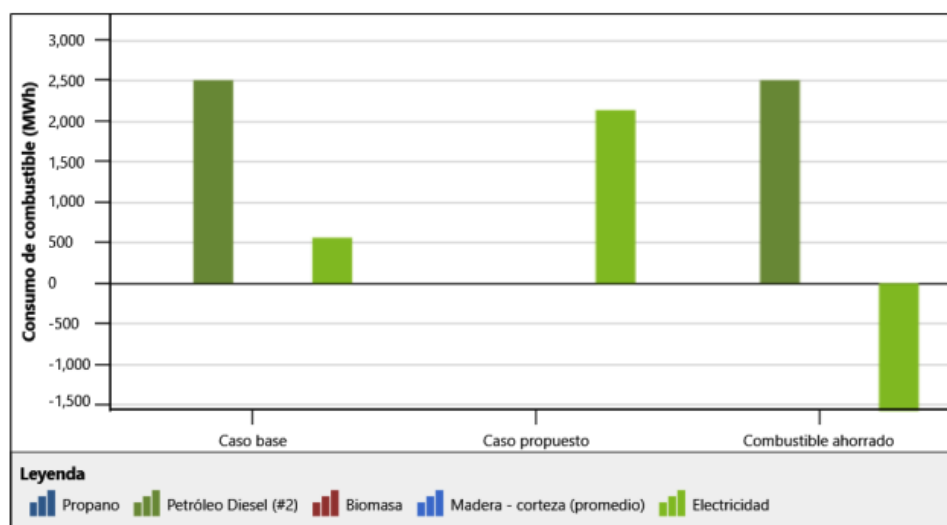


Figura 11.2: Tabla comparativa uso de combustibles Caso base y Caso propuesto. Fuente: Retscreen

Desde una perspectiva ambiental, los beneficios son aún más notables. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se reducen de **784 toneladas de CO₂ anuales** en el caso base a **572 toneladas** en el caso propuesto, lo que representa una **reducción bruta de 213 toneladas de CO₂ por año**. Esta disminución equivale a una mejora relativa del **27,1 %** en términos de impacto ambiental, y es especialmente relevante considerando que el CESFAM se encuentra en una zona con altos índices de contaminación atmosférica. Para dimensionar la magnitud del beneficio, estas **213 toneladas de CO₂ evitadas** son equivalentes a dejar de consumir aproximadamente **91.355 litros de gasolina** al año, lo que refuerza el carácter sostenible de la propuesta y su aporte concreto a la mejora de la calidad del aire en la comuna.

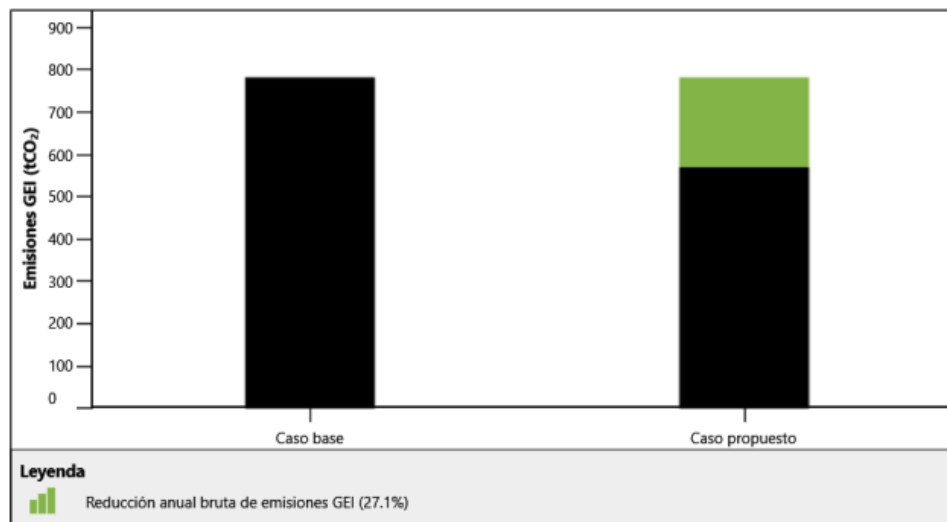


Figura 11.3: Tabla comparativa de emisiones de GEI Caso propuesto II. Fuente: Retscreen

11.4.1. Resultados Financieros

Desde el punto de vista financiero, el análisis del caso propuesto se realizó bajo las mismas suposiciones macroeconómicas establecidas en la propuesta anterior, manteniendo constantes parámetros como la inflación, el horizonte de evaluación y la relación con la deuda. En este escenario, los **costos iniciales totales** ascienden a **\$208.240.980 CLP**, correspondientes principalmente a la adquisición e instalación del sistema de calderas eléctricas y la ampliación del sistema fotovoltaico. Los **costos operacionales anuales** alcanzan un total de **\$351.815.163 CLP**, mientras que los **ingresos y ahorros anuales estimados** alcanzan los **\$369.263.916 CLP**, lo que refleja un diferencial positivo que permite sustentar financieramente la inversión.

Como resultado de esta evaluación, se obtiene una **Tasa Interna de Retorno (TIR) antes de impuestos de activos del 7,4 %**, lo cual indica una rentabilidad moderada en el contexto de proyectos públicos con criterios de sostenibilidad y eficiencia energética. El **período de retorno simple del capital (payback)** se estima en **11,9 años**, mientras que el **período de repago**

descontado que considera el valor temporal del dinero se calcula en **9,5 años**. Estos indicadores reflejan que el proyecto logra recuperar su inversión en el mediano-largo plazo, siempre que se cumpla con el horizonte de operación previsto.

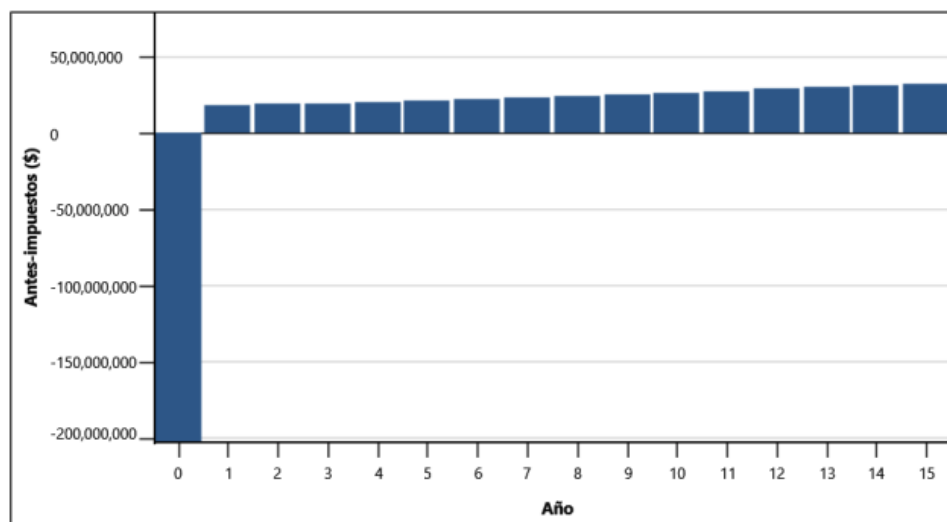


Figura 11.4: Flujo de efectivo anual. Fuente: Retscreen

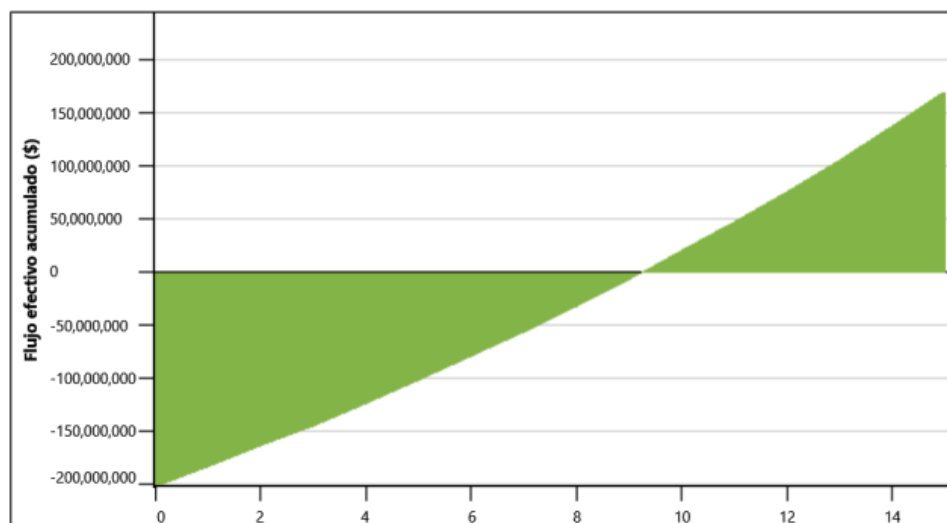


Figura 11.5: Flujo de Caja acumulado. Fuente : Retscreen.

Por otro lado, al aplicar una tasa de descuento del 15 %, obtenida de la plataforma *Economática* como referencia para evaluar proyectos de inversión pública (Economática, 2024), el **Valor Actual**

Neto (VAN) calculado es de aproximadamente **-\$148.896.730 CLP**, lo que indica que, bajo este criterio estricto, el proyecto no sería financieramente rentable. Sin embargo, este resultado no debe interpretarse como un impedimento definitivo para su implementación, ya que se trata de un proyecto de carácter municipal, donde el objetivo principal no es la rentabilidad monetaria, sino la mejora de las condiciones ambientales, energéticas y sociales del territorio. En este tipo de iniciativas públicas, indicadores como el **payback** o el **repago descontado del capital** adquieren mayor relevancia, ya que demuestran que la inversión sí puede ser recuperada dentro del horizonte de vida útil definido. Además, si se considera una extensión del período de evaluación más allá de los 15 años, el VAN eventualmente se tornaría positivo, reafirmando la conveniencia de la propuesta desde una perspectiva integral.

11.4.2. Análisis de Sensibilidad y Riesgo

El análisis de robustez del proyecto se ha realizado considerando un horizonte de evaluación de 15 años, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) antes de impuestos de 7,4 %, un período de repago descontado de 9,5 años y un Valor Actual Neto (VAN) negativo de aproximadamente \$148.896.730 CLP. Estos indicadores reflejan una recuperación parcial de la inversión inicial, pero también señalan ciertos riesgos financieros que deben ser evaluados con mayor profundidad, especialmente considerando la naturaleza pública del proyecto.

La TIR obtenida no supera la tasa de descuento utilizada del 15 %, valor referenciado desde la plataforma *Económica*¹⁹, lo que implica que el retorno del proyecto no es suficiente para igualar el costo de oportunidad del capital. Desde esta perspectiva, el proyecto pierde valor económico frente a otras alternativas de inversión con igual o mayor rentabilidad. El VAN negativo refuerza

¹⁹Económica, 2024.

esta conclusión, dado que los flujos positivos generados durante la vida útil del proyecto no logran compensar completamente los costos iniciales de \$208.240.980 CLP. Además, el payback de 9,5 años representa el 63 % del horizonte total del proyecto, lo que implica un tiempo de recuperación relativamente largo, durante el cual el proyecto se encuentra expuesto a riesgos macroeconómicos y operativos, como variaciones en la inflación, cambios normativos o fluctuaciones tarifarias.

Para entender mejor la sensibilidad del proyecto frente a distintas condiciones, se aplicó un análisis de simulación Monte Carlo. Esta simulación permitió identificar variables críticas que influyen significativamente en los resultados. Por ejemplo, se observó que un aumento del 50 % en los costos iniciales, elevándolos hasta los \$304 millones CLP, tiene un impacto muy negativo en el VAN y extiende aún más el período de repago, lo que pone en riesgo la viabilidad financiera del proyecto. Del mismo modo, si los ahorros esperados en electricidad no se materializan por disminución del rendimiento del sistema fotovoltaico o por alza de tarifas eléctricas, la TIR podría reducirse drásticamente. También es fundamental considerar que la eficiencia de los sistemas técnicos juega un rol clave; cualquier degradación en el rendimiento de las calderas eléctricas o de los paneles solares impacta directamente en los beneficios esperados y, por tanto, en los flujos de caja del proyecto.

La simulación también permite observar la distribución probabilística de la TIR. Aunque el valor medio se mantiene en torno al 7,4 %, si la desviación estándar es alta, existe una probabilidad significativa de que en escenarios adversos la TIR se reduzca por debajo del 5 %, nivel que compromete aún más el atractivo financiero del proyecto.

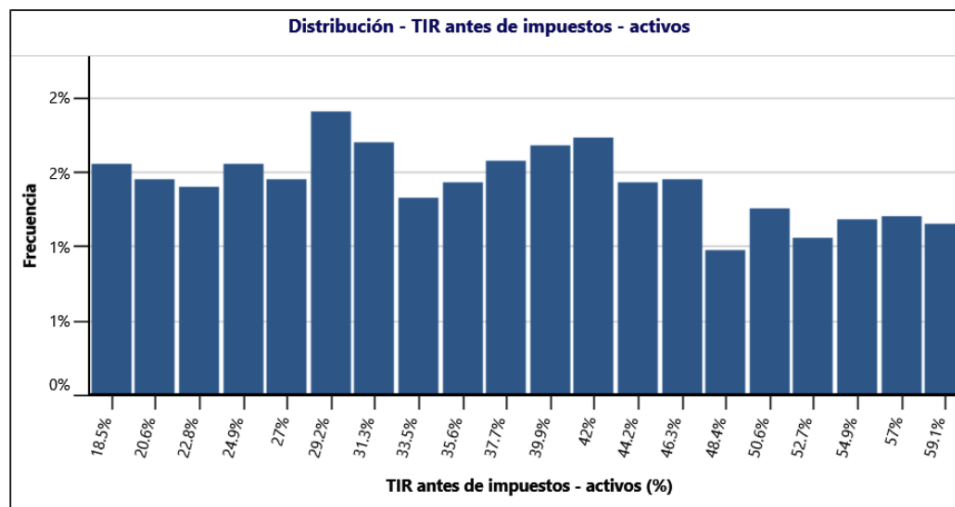


Figura 11.6: Distribución de la TIR antes de impuestos Caso Propuesto II. Fuente: Retscreen

No obstante, es importante recordar que este es un proyecto de carácter municipal, cuyo objetivo principal no es la generación de rentabilidad financiera, sino la mejora de la calidad de vida, la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes. Por ello, indicadores como el VAN deben interpretarse con cautela, y pueden complementarse con otros como el payback o el repago descontado, que muestran que la inversión puede ser recuperada en el horizonte definido. Además, si se extendiera el horizonte de evaluación más allá de los 15 años, se podría obtener un VAN positivo, haciendo que el proyecto no solo sea viable ambiental y socialmente, sino también financieramente en el largo plazo.

12. Análisis cambios en la Envolvente Térmica

El análisis contempla tres escenarios distintos de combustible para el sistema de calefacción del CESFAM: diésel, biomasa (pellet) y electricidad. Esta diferenciación se fundamenta en que el caso base considera el uso de diésel como fuente principal de energía térmica, mientras que el caso propuesto 1 plantea la sustitución por calderas de biomasa, y el caso propuesto 2 opta por un sistema completamente eléctrico. Incluir estos tres casos permite evaluar de forma comparativa el impacto que tendría cada tipo de combustible sobre los potenciales ahorros energéticos y económicos derivados de distintas mejoras en la aislación térmica del edificio. Esta metodología garantiza una visión integral para la toma de decisiones, considerando tanto el contexto actual como las alternativas tecnológicamente viables que fueron analizadas en esta propuesta.

En primer lugar, se evaluó la mejora completa de la envolvente térmica del edificio, lo que incluye muros, ventanas, techos, puertas y pisos. Para una mejora del 15 % en el coeficiente de transmisión térmica (valor U), se obtiene un ahorro energético de **48.311 kWh/año**, lo cual representa un ahorro económico acumulado a 15 años de **118.845.060 CLP** si se utilizara electricidad como fuente de energía, **100.003.770 CLP** si se utiliza diésel, y **72.466.500 CLP** para biomasa. Cuando la mejora es del 20 %, el ahorro energético asciende a **61.483 kWh/año**, lo que implica ahorros de **151.248.180 CLP**, **127.269.810 CLP** y **92.224.500 CLP**, respectivamente. Finalmente, si se logra una mejora del 25 %, el ahorro energético anual es de **78.009 kWh**, traducándose en un ahorro a 15 años de **191.902.140 CLP** con electricidad, **161.478.630 CLP** con diésel y **117.013.500 CLP** con biomasa.

Tabla 12.1: Ahorros en 15 años por mejora total de aislación, según tipo de combustible

Mejora	Diesel (CLP)	Biomasa (CLP)	Electricidad (CLP)
15 % mejora	100.003.770	72.466.500	118.845.060
20 % mejora	127.269.810	92.224.500	151.248.180
25 % mejora	161.478.630	117.013.500	191.902.140

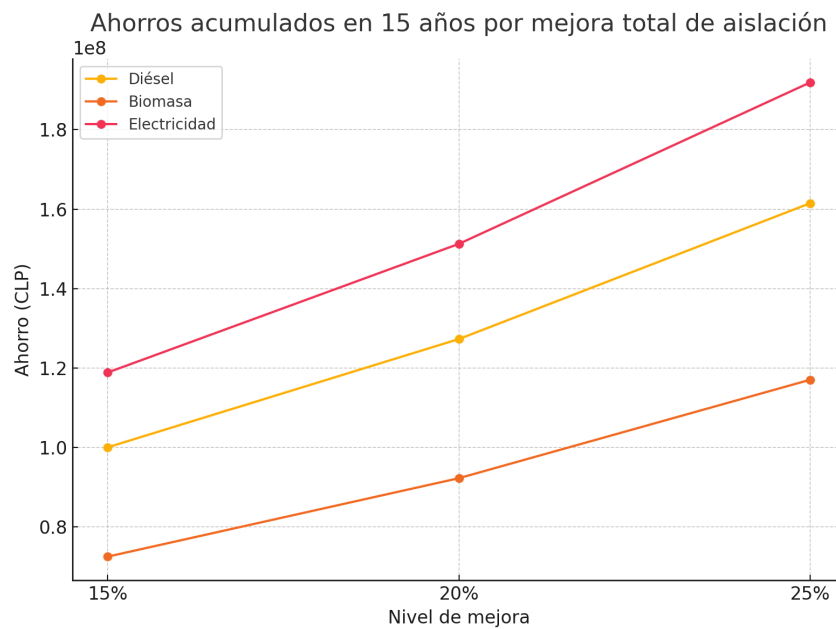


Figura 12.1: Ahorros acumulados en 15 años por mejora total de aislación según tipo de combustible

A simple vista, se observa que el comportamiento de los ahorros acumulados en función del porcentaje de mejora de la aislación térmica presenta una tendencia lineal. Es decir, a medida que se incrementa el nivel de aislación, los ahorros económicos también aumentan proporcionalmente para todos los tipos de combustible evaluados (diésel, biomasa y electricidad). Esta relación directa sugiere que las mejoras en eficiencia energética, cuando se aplican de manera uniforme en toda la envolvente térmica, generan beneficios predecibles y consistentes, lo que facilita la toma de decisiones desde el punto de vista técnico y económico.

En un segundo análisis, se evaluó exclusivamente la mejora de las ventanas, incrementando su aislación térmica en un 50 % (reducción del valor U desde 3 a 1,5). Esto genera un ahorro anual de **35.214 kWh**, que corresponde a un beneficio económico acumulado de **86.626.440 CLP** si se emplea electricidad, **72.892.980 CLP** en caso de utilizar diésel, y **52.821.000 CLP** para biomasa.

Tabla 12.2: Ahorros en 15 años por mejora exclusiva de ventanas (50 %), según tipo de combustible

Medida	Diesel (CLP)	Biomasa (CLP)	Electricidad (CLP)
50 % mejora de ventanas	72.892.980	52.821.000	86.626.440

Por último, se analizó la mejora de la aislación de los muros periféricos, reduciendo el valor U en un 20 %. Esta medida, si bien más localizada, permite un ahorro anual de **9.093 kWh**, correspondiente a **22.368.780 CLP** si se usa electricidad, **18.822.510 CLP** con diésel y **13.639.500 CLP** en el caso de biomasa, todos considerados a 15 años.

Tabla 12.3: Ahorros en 15 años por mejora localizada de aislación (20 %), según tipo de combustible

Medida	Diesel (CLP)	Biomasa (CLP)	Electricidad (CLP)
20 % mejora localizada	18.822.510	13.639.500	22.368.780

A pesar de que los valores de ahorro acumulado resultan elevados, es importante destacar que estos representan los montos máximos que podrían invertirse en dichas mejoras (considerando materiales y mano de obra) para que sean financieramente viables. En ese sentido, estos resultados sirven como umbral para evaluar la conveniencia económica de las inversiones. Por ejemplo, si el costo de cambiar completamente la envolvente supera los 191 millones de pesos (en el caso de

calefacción eléctrica), dicha intervención podría no justificarse financieramente. Lo mismo aplica para las ventanas o la mejora localizada de aislación: si los costos de implementación son mayores a los ahorros proyectados, no se justificaría su ejecución desde un punto de vista económico, aunque sí podrían ser consideradas por criterios de confort o impacto ambiental.

Cabe señalar que los valores de transmitancia térmica (valores U) utilizados en este análisis corresponden a los establecidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), los cuales son comúnmente aplicados en edificaciones públicas en Chile. Si bien estos valores cumplen con la normativa vigente y permiten resultados razonables en términos de eficiencia energética, su exploración y optimización en etapas tempranas de planificación y diseño arquitectónico podría resultar altamente beneficiosa. Simulaciones realizadas en este estudio demuestran que mejoras progresivas en la aislación pueden traducirse en ahorros energéticos y económicos significativos a lo largo de la vida útil del edificio, por lo que se sugiere considerar ajustes específicos en función del contexto climático local y del uso del inmueble como estrategia complementaria de eficiencia.

13. Conclusiones y Recomendaciones

El análisis comparativo de distintas estrategias de mejora térmica en la envolvente del CESFAM permitió evidenciar que, independientemente del tipo de combustible utilizado (diésel, biomasa o electricidad), existe una relación directa entre el nivel de aislación y los ahorros energéticos y económicos acumulados a lo largo del tiempo. Mejoras integrales del 15 %, 20 % y 25 % en los elementos constructivos pueden traducirse en ahorros de hasta 191 millones de pesos en un horizonte de 15 años, dependiendo del escenario energético. Además, si bien estas cifras pueden parecer elevadas, representan umbrales máximos de inversión que podrían ser costeables si se consideran materiales y mano de obra dentro de esos márgenes. Estas medidas refuerzan la importancia de considerar desde el diseño arquitectónico los niveles óptimos de aislación, particularmente en climas extremos como el de Coyhaique, para lograr construcciones más eficientes, confortables y sostenibles en el largo plazo.

A partir del análisis comparativo entre las dos propuestas de mejora energética para el CESFAM Coyhaique, es posible extraer diversas conclusiones tanto desde el punto de vista técnico-económico como ambiental. El **caso propuesto 1** contempla la implementación de una **caldera de biomasa a pellet** para reemplazar el sistema de calefacción a diésel, complementada con un sistema fotovoltaico que cubre la mitad del techo del edificio. Por otro lado, el **caso propuesto 2** considera un cambio total hacia un sistema de calefacción eléctrica, apoyado por un sistema fotovoltaico que utiliza la **totalidad de la cubierta disponible**.

En términos económicos, el caso propuesto 1 destaca por su excelente desempeño financiero. Si bien el consumo de pellet es considerable (406 toneladas al año), su bajo costo unitario en comparación con combustibles tradicionales como el diésel o la electricidad permite una operación

altamente rentable. Esto se ve reflejado en indicadores sólidos como una TIR del 97 %, un payback de solo 1,1 años y un VAN positivo. Estas cifras evidencian que se trata de una solución que no solo es eficiente desde el punto de vista energético, sino también altamente sostenible en términos financieros. Asimismo, el impacto ambiental es notable, ya que las emisiones de CO₂ se reducen desde 784 toneladas en el caso base a solo 93,3 toneladas anuales, lo que representa una reducción del 88,1 %, equivalente a 296.859 litros de gasolina no consumidos por año.

Por su parte, el caso propuesto 2 apuesta por una solución basada exclusivamente en electricidad, eliminando por completo el uso de combustibles sólidos o líquidos. Si bien este enfoque presenta ventajas importantes como la operación limpia, automatizada y sin emisiones locales, los resultados financieros son más discretos. Con una TIR de 7,4 %, un payback de 11,9 años y un VAN negativo de \$148 millones, se demuestra que el proyecto es menos rentable desde el punto de vista económico. No obstante, esta propuesta presenta una gran **robustez operativa y simplicidad de mantenimiento**, y mantiene un comportamiento aceptable si se considera que se trata de una infraestructura pública cuyo objetivo no es la rentabilidad financiera, sino la prestación eficiente de servicios esenciales a la comunidad.

En este sentido, es importante destacar que los centros de salud como el CESFAM Coyhaique no buscan generar retornos económicos, sino garantizar continuidad operacional, confort térmico, y reducción del impacto ambiental. Desde esa perspectiva, ambos proyectos son viables, y el hecho de que en el caso 2 el repago del capital se realice dentro del mismo horizonte de evaluación (15 años) lo posiciona como una alternativa técnicamente válida. Además, si se extiende el horizonte de vida útil del proyecto, el VAN se volvería positivo, mejorando así su evaluación global.

Finalmente, se recomienda priorizar el **caso propuesto 1** desde una óptica costo-eficiencia, especialmente si los recursos públicos son limitados y se requiere una rápida recuperación de la

inversión. No obstante, el **caso propuesto 2** no debe ser descartado, ya que representa una solución de largo plazo más limpia y sencilla de operar. En el marco de políticas públicas de descarbonización y electrificación de los consumos energéticos, esta segunda alternativa podría alinearse mejor con los objetivos estratégicos nacionales y locales de sostenibilidad ambiental.

En términos generales, ambas propuestas resultan ser viables y representan un avance significativo en cuanto a eficiencia energética. Cada una de ellas implica un ahorro energético importante —en distintas magnitudes— que se traduce en beneficios tangibles tanto para el funcionamiento del establecimiento como para la comunidad. La implementación de estas medidas no solo reduce el consumo de energía, sino que también disminuye de forma considerable las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual tiene un impacto positivo a nivel ambiental y sanitario. Es fundamental destacar que el CESFAM no busca una rentabilidad financiera como objetivo principal, sino que su propósito central es mejorar la calidad de atención hacia sus pacientes y aportar al bienestar general de la comuna. Por lo tanto, desde esta perspectiva, cualquiera de las dos alternativas puede considerarse adecuada y conveniente, en la medida que contribuye a mejorar las condiciones del entorno, la eficiencia operativa del centro de salud y la experiencia de quienes lo utilizan.

Referencias

- Agency, I. E. (2023). Electricity Information: Transmission and Distribution Losses [Available at: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>].
- ASHRAE. (2019). *ASHRAE Handbook – HVAC Applications, Chapter 57: Integrated Building Design*. American Society of Heating, Refrigerating; Air-Conditioning Engineers.
- Caldera / Termo Eléctrico Industrial de 300 litros 54 kW. (2025). Termic Ltda. Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://www.termoelectrico.cl/pagina-del-producto/termoelectrico-industrial-de-300-litros-54-kw>
- Canales, P. (2020). Ventilación con Recuperación de Calor - Presentación técnica [Documento técnico revisado donde se menciona eficiencia de hasta 85 % para sistemas de recuperación de calor].
- Consultores Proyecto CESFAM. (2017). Informe de Eficiencia Energética CESFAM Coyhaique [Documento técnico interno del proyecto].
- de Energía, C. N. (2023, noviembre). *Proyección de la Demanda de Energía 2023–2042* (inf. téc.) (Informe Técnico de Proyección de Demanda, Chile). Comisión Nacional de Energía, Chile. <https://www.cne.cl>
- de Energía, M. (2022). *Política Energética Nacional 2050* (inf. téc.) (Actualización 2022). Gobierno de Chile. <https://www.energia.gob.cl/>
- de Salud de Chile, M. (1994, febrero). *Decreto Supremo N.º 543: Declara norma oficial la NCh 2196 Gases comprimidos – Redes de tuberías para distribución de gases de uso médico, no inflamables* (inf. téc.) (Publicación oficial). Diario Oficial de la República de Chile. <https://bcn.cl/3lp7v>

- de Vivienda y Urbanismo de Chile, M. (2017, noviembre). *Decreto Exento N.º 136: Declara como Norma Oficial de la República de Chile la NCh1198:2014 Madera – Construcciones en Madera – Cálculo* (inf. téc.) (Publicación oficial). Diario Oficial de la República de Chile. <https://bcn.cl/3mip2>
- de Vivienda y Urbanismo de Chile, M. (2024, mayo). *Modificación al artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC): Reglamentación Térmica* (inf. téc. N.º 43.860) (Publicada el 27 de mayo de 2024). Diario Oficial de la República de Chile.
- del Medio Ambiente de Chile, M. (2022, noviembre). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990–2020: Resumen de Puntos Clave* (inf. téc.) (Documento difundido durante la COP27). División de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente.
- del Medio Ambiente de Chile, M. (2023a). Los beneficios de la calefacción con pellets [Accedido el 31 de julio de 2025]. <https://mma.gob.cl/los-beneficios-de-la-calefaccion-con-pellets/>
- del Medio Ambiente de Chile, M. (2023b). Propuesta desde la Mesa del Pellet para el desarrollo del sector [Accedido el 31 de julio de 2025]. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/documento_mesa_nacional_de_pellet_2023.pdf
- del Medio Ambiente de Chile, M. (2025). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero* [Consultado el 23 de julio de 2025]. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones/>
- DIALUX. (2025). *Memoria de Cálculo de Iluminación CESFAM Coyhaique* (inf. téc.) (Documento técnico entregado en licitación: 01-DOC-CCO-MC_Memoria de cálculos de iluminación Piso 1). Proyecto CESFAM Coyhaique.
- Economática. (2024). Base de datos financiera para América Latina [Disponible en: <https://economica.com>].

Especialidad Construcción – Módulo Cubicación de Materiales e Insumos [Plan Común, OA5

Cubicar manual y digitalmente elementos y materiales requeridos para una obra determinada, en base a la Norma NCh353.Of2000. Documento interno de guía de contenidos]. (2023).

IPCC. (2021). Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis

[Intergovernmental Panel on Climate Change]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

LONGi. (2022, octubre). *Hi-MO 6 Scientists: LR5-54HTH 435 450M* [Datos técnicos del módulo

fotovoltaico Hi-MO 6, modelo LR5-54HTH.]. Ver. 20221026DraftX03. LONGi. Xi'an, Shaanxi, China. <https://www.longi.com>

Ministerio de Energía de Chile. (2023a). Balance Nacional de Energía 2022 [Factores de emisión y estadísticas energéticas nacionales.].

Ministerio de Energía de Chile. (2023b). Plataforma Comuna Energética - Coyhaique [Disponible en: <https://old.comunaenergetica.cl/coyhaique/>].

Ministerio de Salud de Chile. (2018). Normativa y Estándares de Infraestructura para Establecimientos de Salud [Guías técnicas para CESFAM.].

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. (2009). Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social [Accedido en julio de 2025].

Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. (2022). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10 – Reglamentación Térmica [Normativa chilena vigente sobre eficiencia térmica en la construcción]. <https://www.minvu.gob.cl/>

NCh1079.Of77: Arquitectura y construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico [Norma Chilena Oficial]. (1977). Instituto Nacional de Normalización (INN).

NCh348.Of1999 Cierros provisionales — Requisitos generales de seguridad [Declarada Oficial de la República por Decreto N.º 6 del Ministerio de Obras Públicas, publicada en el Diario Oficial N.º 36.453, el 31 de agosto de 1999]. (1999). Instituto Nacional de Normalización (INN).

NCh350.Of2000 Construcción — Seguridad — Instalaciones eléctricas provisionales — Requisitos [Declarada Oficial de la República por Decreto N.º 1081 del Ministerio de Obras Públicas, publicada en el Diario Oficial N.º 36.649 el 27 de abril de 2000]. (2000). Instituto Nacional de Normalización (INN).

NCh691:2015 Agua potable — Producción, conducción, almacenamiento y distribución — Requisitos de diseño [Norma Chilena Oficial]. (2015). Instituto Nacional de Normalización (INN).

Norma Técnica Básica de Autorización Sanitaria para Establecimientos de Salud de Atención Cerrada (inf. téc.). (2013) (Anexo 1, Capítulo IV, Sección 7, establece que la temperatura del agua caliente debe alcanzar 60 °C). Ministerio de Salud de Chile.

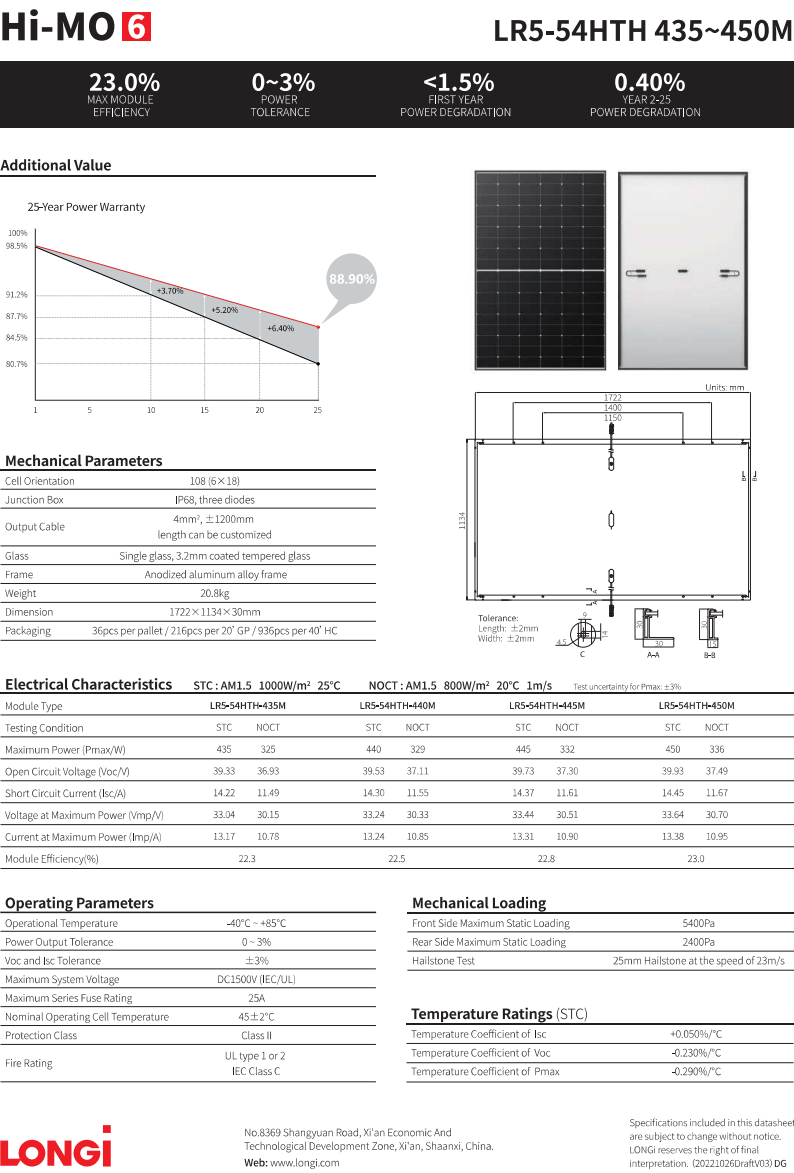
NT-112: Ventilación como Método de Control de Contaminantes en Recintos Hospitalarios (actualización NT-43) (inf. téc.). (2016) (Norma técnica oficial para diseño de ventilación en establecimientos de salud en Chile). Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), Gobierno de Chile. <https://www.minvu.gob.cl>

Uniclimate. (2025a). Caldera a pellet GRA 115 kW - Uniclimate [Accedido el 31 de julio de 2025]. https://uniclima.cl/caldera_a_pellet/2107-cald__uniclima_gra__115_kw.html

Uniclimate. (2025b). Caldera a pellet GRA 250 kW - Uniclimate [Accedido el 31 de julio de 2025]. https://uniclima.cl/caldera_a_pellet/2113-cald__uniclima_gra_250_kw.html

14. Anexos

Ficha técnica oficial del panel fotovoltaico (página 2 del documento original):



Ficha técnica oficial de la Caldera:

UniClima
bio

Calderas a Pellet UniClima Gra

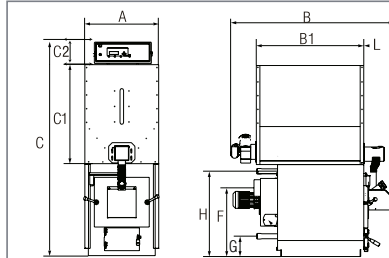
Calderas de Piso

Características Funcionales

- Caldera con combustible a pellet de madera de bajo costo en el consumo y rendimiento muy elevado, para producción de agua caliente para calefacción y uso sanitario. Particularmente adaptadas para la calefacción del ambiente de uso civil e industrial.
- Panel de funcionamiento electrónico, que regula la potencia de caldera.
- Encendido automático de pellet, no necesita intervenir el hogar.
- Operación automática programada.
- Fabricación en acero permite intercambios de temperatura.
- Uso hogar e industria por su fabricación compacta es ideal para aplicaciones pequeñas y grandes.
- Agua caliente calefacción regulada por control digital.
- Alimentación de pellet automático.
- Sistemas de seguridad de llama.
- Alimentador de pellet de gran capacidad.



Dimensiones



Modelo	20	30	40	50	80	115	150	250
A	550	620	690	690	768	862	862	750
B	1237	1310	1510	1510	1120	1130	1480	2285
B1	770	900	1100	1100	-	-	-	1200
C	1460	1600	1780	1780	1129	1352	1352	1675
C1	632	830	830	830	-	-	-	-
C2	180	180	-	-	-	-	-	190
L	243	260	260	260	260	260	260	-
H	575	715	880	880	1035	1253	1253	-
F	475	560	763	763	870	1030	1030	-
G	135	170	192	192	380	350	350	110

* Unidad de Medida mm

Características Técnicas

CALDERA GRA		20	30	40	50	80	115	150	250
Potencia útil	Kw	20	30	40	50	80	110	150	240
Peso	Kg	200	280	370	370	400	560	670	790
Volumen depósito	Kg	100	200	280	280	190	276	362	420
Capacidad caldera	Lt	47	68	117	117	5	10	12	12
Pérdidas de carga lado agua	mbar	10	10	10	10	0.03	0.05	0.05	0.06
Pérdidas de carga lado humos	mbar	0.03	0.03	0.06	0.06	3	3	3	5
Presión de trabajo	bar	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	7.5
Presión máxima de ensayos	bar	4.5	4.5	4.5	4.5	-	-	-	-
CÓDIGO RECAL	-	CABPGRGA020	CABPGRGA030	CABPGRGA040	CABPGRGA050	CABPGRGA080	CABPGRGA115	CABPGRGA150	CABPGRGA250

CÓDIGO BECA

Calderas a Pellet / Biomasa / **Recal**

51

BIOMASA

Figura 14.2: Ficha técnica de la caldera de biomasa.



Características Generales de Nuestros Termos Eléctricos Trifásicos

¿Qué es un Termo Trifásico?

Es un equipo de calentamiento de agua que funciona con corriente trifásica, ideal para usos de alta demanda en instalaciones comerciales o industriales.



Modelo	TE500	TEI30036	TEI30045	TEI30054
Capacidad	500 Litros	300 Litros	300 Litros	300 Litros
Potencia	Trifásica de 9 kW (3x3.0kW)	Trifásica de 36 kW (9 x 4.0 kW esmaltadas)	Trifásica de 45 kW (9 x 5.0 kW esmaltadas)	Trifásica de 54 kW (9 x 6.0 kW)
Diámetro	71 cm	65 cm	65 cm	71 cm
Profundidad	71 cm	81 cm	81 cm	81 cm
Altura total	193 cm	153 cm	153 cm	153 cm
Instalación	Pie / Piso	Pie / Piso	Pie / Piso	Pie / Piso
Peso (vacío/lleño)	138 / 638 kg	138 / 438 kg	138 / 438 kg	138 / 438 kg
Aislación	Poliuretano 50mm	Poliuretano 55mm	Poliuretano 55mm	Poliuretano 55mm
Voltaje y Frecuencia	380V/ 50hz.	380V/ 50hz.	380V/ 50hz.	380V/ 50hz.
Amperaje	23,7 Amp	94,7 Amp	118,4 Amp	142,1 Amp
Temperatura de funcionamiento	entre 48° a 82°, de fábrica a 70°	Regulable entre 10° a 75°	Regulable entre 10° a 75°	Regulable entre 10° a 75°
Presión	10 Bar/ 98°C	10 Bar/ 98°C	10 Bar/ 98°C	10 Bar/ 98°C
Tiempo de Recuperación	De 10°C a 45°C: 136' De 45°C a 75°C: 116'	36 minutos	29 minutos	24 minutos
Tratamiento Interior	Acero Vitrificado a 860°C	Acero Vitrificado a 860°C	Acero Vitrificado a 860°C	Acero Vitrificado a 860°C
Rosca o Hilo de Conexión	1" HI	3/4"	3/4"	3/4"
Protección contra Oxidación	Anodo de Magnesio	Doble anodo de magnesio	Doble anodo de magnesio	Doble anodo de magnesio
Resistencia Eléctrica	Incoloy 840 - garantiza una larga vida útil	Incoloy 840 - garantiza una larga vida útil	Incoloy 840 - garantiza una larga vida útil	Incoloy 840 - garantiza una larga vida útil
Vida útil Esperada	10 - 15 años sujeto a mantención	10 - 15 años sujeto a mantención	10 - 15 años sujeto a mantención	10 - 15 años sujeto a mantención
Garantías	Termo: 3 años sujeto a mantención periódica Accesorios: 12 meses	Termo: 2 años sujeto a mantención periódica Accesorios: 12 meses	Termo: 2 años sujeto a mantención periódica Accesorios: 12 meses	Termo: 2 años sujeto a mantención periódica Accesorios: 12 meses

Termos Eléctricos, Calefont, Paneles Solares, Sistemas Fotovoltaicos y mucho más..

San Pablo 3545, Quinta Normal, Región Metropolitana de Santiago • Chile
Teléfonos: +56 2 2980 5423 | +56 9 3932 2429 • ventas@termic.cl | postventas@termic.cl

TERMIC.CL
TERMOELECTRICO.CL

Figura 14.3: Ficha técnica de la caldera delectrica.

14.1. Pantallazos RetScreen

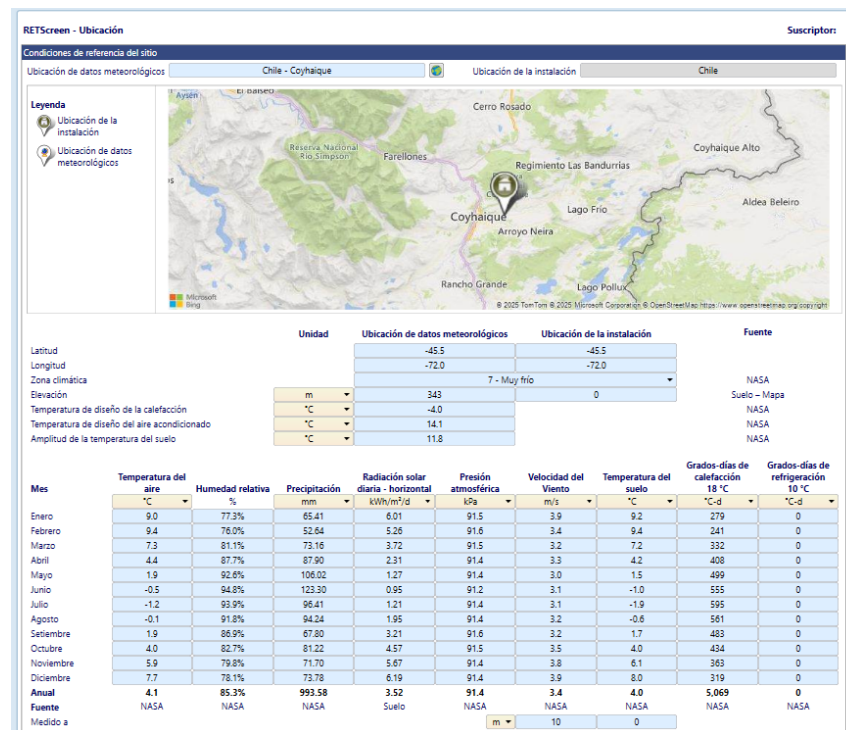


Figura 14.4: Pantallazo Programa RetScreen



Figura 14.5: Pantallazo Programa RetScreen

RETScreen - Modelo de Energía

Comercial/Institucional - CESFAM COYHAKUE - Servicios de salud

Suscriptor:

Combustibles y horarios

Electricidad y combustibles

Horarios

Equipo

Calentamiento

Enfriamiento

Bomba de calor

Uso final

Envoltorio del edificio

Ventilación

Ventilación

Luminarias

Luminarias

Equipo eléctrico

Equipo eléctrico

Optimizar suministro

Electricidad

Fotovoltaico

Resumen

Incluir medidas?

Comparación

Sistema de producción de calor

Descripción: Caldera

Nota:

Método: Un solo combustible

Opciones: Aprendizaje en línea, RETScreen Connect

Sistema de producción de calor

Tecnología: Caldera

Tipo de combustible: Petróleo Diesel (#2) - L

Precio del combustible: 1.175 \$/L

Equipo de calefacción: 80%

Eficiencia estacional: 80%

Costos iniciales incrementales: 32,819,400

Ahorros incrementales O y M: 0

Caso base: Caldera

Caso propuesto: Caldera

Petróleo Diesel (#2) - L

Electricidad

164 \$/kWh

Figura 14.6: Pantallazo Programa RetScreen

RETScreen - Modelo de Energía

Comercial/Institucional - CESFAM COYHAKUE - Servicios de salud

Suscriptor:

Combustibles y horarios

Electricidad y combustibles

Horarios

Equipo

Calentamiento

Enfriamiento

Bomba de calor

Uso final

Envoltorio del edificio

Ventilación

Ventilación

Luminarias

Luminarias

Equipo eléctrico

Equipo eléctrico

Optimizar suministro

Electricidad

Fotovoltaico

Resumen

Incluir medidas?

Comparación

Sistema de enfriamiento

Descripción: Bomba de calor

Nota:

Opciones: Aprendizaje en línea, RETScreen Connect

Sistema de enfriamiento

Tecnología: Bomba de calor

Tipo de combustible: Electricidad

Precio del combustible: 164 \$/kWh

Equipo de refrigeración: 0.5

Coefficiente de rendimiento - estacional: 0.5

Costos iniciales incrementales: 0

Ahorros incrementales O y M: 0

Caso base: Bomba de calor

Caso propuesto: Bomba de calor

Electricidad

164 \$/kWh

Figura 14.7: Pantallazo Programa RetScreen

RETScreen - Modelo de Energía

Comercial/Institucional - CESFAM COYHAKUE - Servicios de salud

Suscriptor:

Combustibles y horarios

Electricidad y combustibles

Horarios

Equipo

Calentamiento

Enfriamiento

Bomba de calor

Uso final

Envoltorio del edificio

Ventilación

Ventilación

Luminarias

Luminarias

Equipo eléctrico

Equipo eléctrico

Optimizar suministro

Electricidad

Fotovoltaico

Resumen

Incluir medidas?

Comparación

Envoltorio del edificio

Descripción: Envoltorio del edificio

Nota:

Opciones: Aprendizaje en línea, RETScreen Connect

Envoltorio del edificio

Norte del edificio: 45

Horario: 24/7

Costos iniciales incrementales: 0

Parámetros

Área: 216

Área neta: 179

Valor-U: 0.35

Costos iniciales incrementales: 0

Ventanas

Área: 15%

Valor-U: 3

Coefficiente de ganancia de calor solar: 0.7

Costos iniciales incrementales: 0

Puertas

Área: 2%

Valor-U: 1.7

Costos iniciales incrementales: 0

Techo

Área: 1,869

Valor-U: 0.25

Costos iniciales incrementales: 0

Piso

Área: 1,869

Valor-U: 0.32

Costos iniciales incrementales: 0

Infiltración de aire natural

Método: Calculado

Figura 14.8: Pantallazo Programa RetScreen

Infiltración de aire natural

Método: Calculado

Paredes: Con fugas

Ventanas: Con fugas

Puertas: Con fugas

Infiltración de aire natural: 2.203

Costos iniciales incrementales: 0

Costos iniciales incrementales - total: 0

Ahorros incrementales O y M: 0

Número de unidades de cobertura del edificio: 1

Selección de sistema: Calefacción y Enfriamiento

Sistema de producción de calor: Caldera

Demanda de calor: 743.038 kWh

Sistema de enfriamiento: Bomba de calor

Demanda de enfriamiento: 0 kWh

Energía ahorrada: 0, 0%, 0, 0%

Figura 14.9: Pantallazo Programa RetScreen

RETScreen - Modelo de Energía

Comercial/Institucional - CESFAM COYHUAQUE - Servicios de salud

Descripción: Ventilación

Nota:

Método: Método 1

Opciones: Aprendizaje en línea, RETScreen Connect

Ventilación - Método 1

	Caso base	Caso propuesto	Energía ahorrada
Horario	24/7	24/7	
Flujo	20.770 L/s	20.770	
Aire fresco	100%	100%	
Recalentamiento del sistema	Si	Si	
Selección de sistema	Calefacción y Enfriamiento	Calefacción y Enfriamiento	
Control del ventilador	Constante	Constante	
Control de ventilación	Constante	Constante	
Fuga de compuerta de admisión	Ajustado	Ajustado	
Eficiencia de recuperación de calor	77%	77%	
Método de estimación de costos	Nivel 1	Nivel 1	
Costos iniciales incrementales	0	0	
Ahorros incrementales O y M	0	0	
Número de unidades de ventilación	1	1	
Sistema de producción de calor	Caldera	Caldera	
Demanda de calor	1.136.375 kWh	1.136.375	0, 0%

Figura 14.10: Pantallazo Programa RetScreen

RETScreen - Modelo de Energía

Comercial/Institucional - CESFAM COYHUAQUE - Servicios de salud

Descripción: Luminarias

Nota:

Nivel: Nivel 1

Opciones: Aprendizaje en línea, RETScreen Connect

Luminarias - Nivel 1

	Caso base	Caso propuesto	Energía ahorrada
Área del piso	3.738 m²	3.738	
Carga de iluminación por unidad de área	0.65 W/m²	0.65	
Horas de operación	24 h/d	24	
Costos iniciales incrementales	0	0	
Ahorros incrementales O y M	0	0	
Número de unidades	1	1	
Demanda de electricidad	217.753 kWh	217.753	0, 0%

Impacto del aire acondicionado: 0%

Impacto de la calefacción ambiental: 0%

Figura 14.11: Pantallazo Programa RetScreen

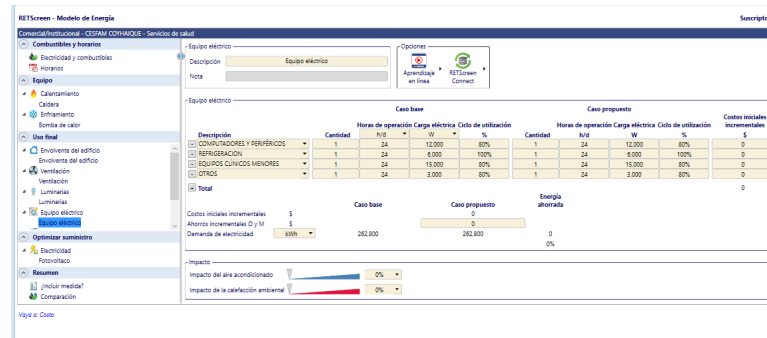


Figura 14.12: Pantallazo Programa RetScreen

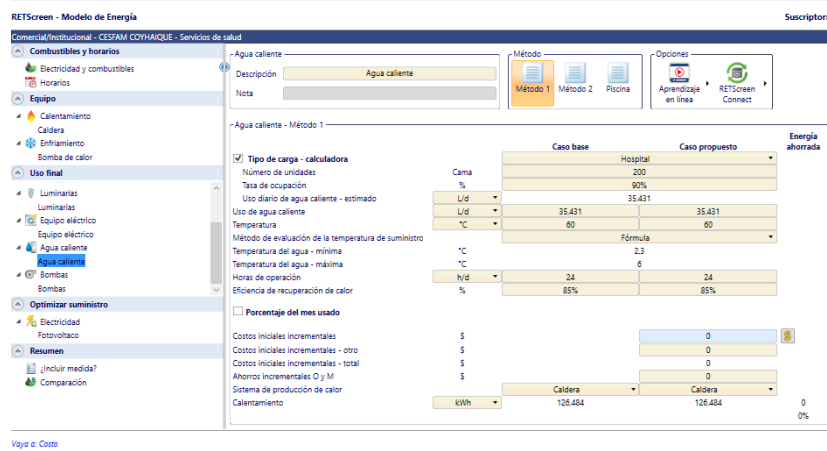


Figura 14.13: Pantallazo Programa RetScreen

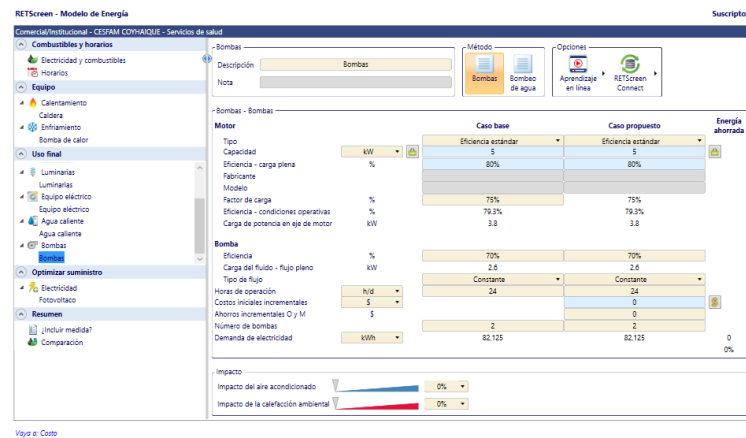


Figura 14.14: Pantallazo Programa RetScreen

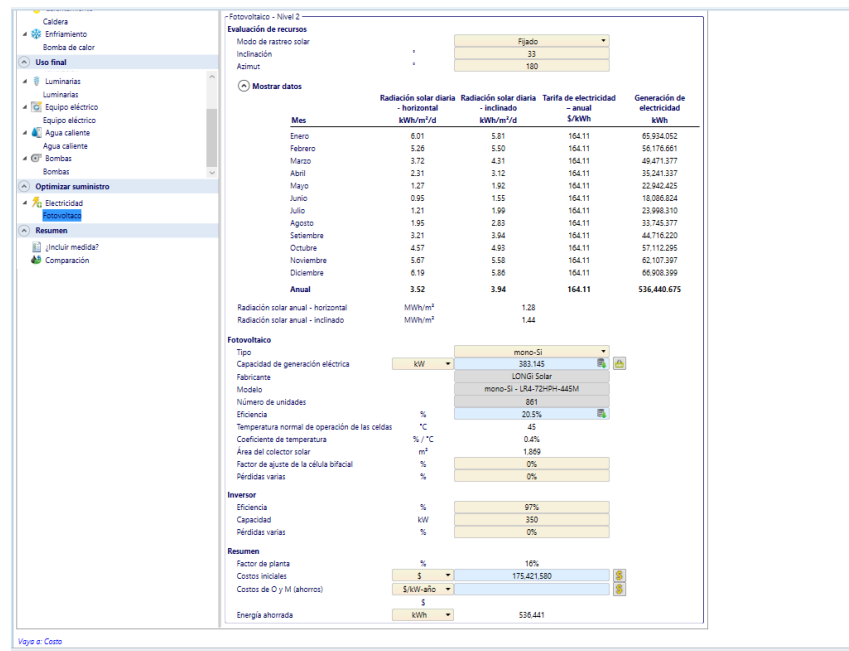


Figura 14.15: Pantallazo Programa RetScreen