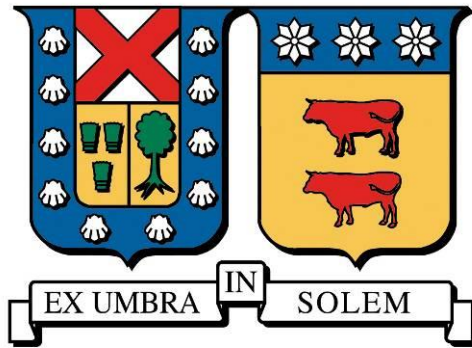




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Evaluación de la electrificación de procesos térmicos
empleados en agua caliente, mediante implementación de
bombas de calor**

Cristóbal Medina González

MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA

2025



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: Evaluación de la electrificación de procesos térmicos empleados en agua caliente, mediante implementación de bombas de calor

Nombre del candidato(a): Cristóbal Eduardo Medina González

Carrera / Grado: Magister en economía energética

Campus: Vitacura Departamento: - Departamento de Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Balderrama Aníñir, 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 (marcar una opción)

x 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 (marcar una opción):

☐ 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:

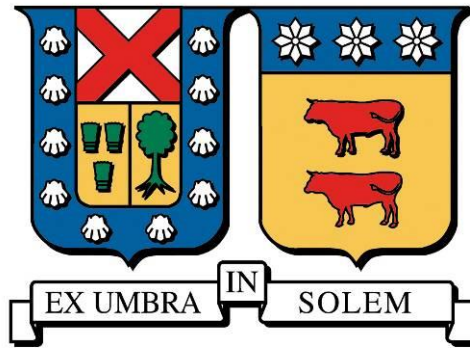
Fecha: _____ Firma: Rodrigo Balderrama

Firmado digitalmente
por Rodrigo Balderrama
Fecha: 2025.11.06
11:33:58 -03'00'

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05 de Noviembre de 2025 Firma: [Firma manuscrita]

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.



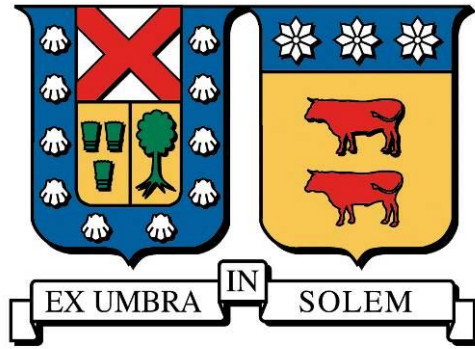
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Evaluación de la electrificación de procesos térmicos
empleados en agua caliente, mediante implementación
de bombas de calor**

Cristóbal Medina González

MAGÍSTER EN ECONOMÍA ENERGÉTICA

2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“Evaluación de la electrificación de procesos
térmicos empleados en agua caliente, mediante
implementación de bombas de calor”**

Tesina de grado presentada por

Cristobal Medina

como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Economía Energética

Profesor Guía
Mg. Ing. Rodrigo Valderrama

Profesor Correferente
Mg. Ing. Rodrigo Rozas

Profesor Correferente externo
Mg. Ing. Celso Tapia Sánchez

Julio 2025

TITULO DE LA TESINA:

Evaluación de la electrificación de procesos térmicos, en particular, agua caliente, a través de implementación de bombas de calor.

AUTOR:

CRISTOBAL MEDINA

TRABAJO DE TESINA, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Economía Energética del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Ing. Rodrigo Valderrama.....

Ing. Rodrigo Rozas.....

Ing. Celso Tapia Sánchez.....

Julio de 2025, Santiago, Chile.



ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
GLOSARIO.....	6
1. Introducción y motivación.....	7
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3. Metodología de trabajo	10
4. CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE	11
4.1.1 Descarbonización y eficiencia energética.	11
4.1.2 Electrificación térmica de procesos.....	11
4.1.3 Ventajas de la electrificación de procesos térmicos.....	12
5. Tecnología Bombas de Calor.....	13
5.1.1 Bombas de calor aplicadas a procesos térmicos	13
5.1.2 Bombas de calor industriales	14
5.1.3 Avances tecnológicos recientes.....	15
6. CAPITULO 2: IMPLEMENTACIÓN GLOBAL.....	20
6.1 Casos internacionales de implementación de bombas de calor.	20
6.2 Casos nacionales de implementación de bombas de calor.	20
6.3 Aplicaciones industriales industria nacional	21
6.4 Desafíos tecnológicos y económicos	21
7. CAPITULO 3: PRODUCCIÓN TÉRMICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL EN CHILE	22
7.1.1 Importancia del consumo térmico residencial	22
7.1.2 Fuentes energéticas predominantes	23
7.2 Tendencias hacia la transición energética	23
7.3 Evaluaciones técnicas y económicas.....	24



7.4	Requerimientos térmicos en procesos industriales y residenciales para la aplicación de bombas de calor.....	24
7.4.1	Requerimientos térmicos en procesos industriales.....	24
7.4.2	Requerimientos térmicos en procesos residenciales	26
7.5	Oportunidades para la aplicación de bombas de calor	27
8.	CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO APLICACIÓN RESIDENCIAL.....	27
9.	CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO APLICACIÓN INDUSTRIAL	41
10.	industrias nacionales en base térmica productiva.....	43
10.1.1	Predominio del sector “Otros / No Clasificado” (69,1%).....	45
10.2	Sectores identificados con uso intensivo de calor.....	45
10.3	Relevancia estratégica del análisis térmico	46
10.4	Potencias térmicas distribuidas regionalmente	46
10.5	Reemplazo de productor térmico por tipos de industria.....	48
11.	CAPITULO 6: DESCARBONIZACIÓN DE LA MATRIZ ELÉCTRICA NACIONAL.....	50
11.1	Emisiones CO_2 y sus factores	51
12.	CAPITULO 7: REGULACION, NORMATIVA Y PLANIFICACIÓN	57
12.1.1	Regulaciones europeas para la eliminación de calderas de gas y promoción de bombas de calor.....	57
12.1.2	Análisis regulatorio y normativo nacional.....	58
12.1.3	Ley de Eficiencia Energética (2021)	59
12.1.4	Marco normativo nacional: políticas públicas que impulsan la electrificación térmica en Chile	59
12.1.5	Estrategia Nacional de Calor y Frío (2021)	59
12.1.6	Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022–2026.....	60
12.1.7	Presiones actuales sobre la industria para la descarbonización.....	60
12.1.8	Ley Marco de Cambio Climático (Ley 21.455)	60
12.1.9	Plan de Descarbonización del Sector Energético	61
13.	Proyecto de ley distribución	61



13.1	Estado actual del proyecto de ley de distribución eléctrica.....	62
14.	Conclusiones	63
15.	Anexos	64
15.1	Carta Gantt	64
16.	Referencias.....	64

RESUMEN

Mediante la presente tesina, conoceremos la tecnología de bomba de calor, por la que pretendemos evaluar viabilidad técnico-económica en electrificar procesos térmicos para la generación de agua caliente mediante bombas de calor, considerando aplicaciones tanto industriales como residenciales en Chile. La iniciativa se enmarca en el desafío de descarbonizar el sector térmico, tradicionalmente dependiente de combustibles fósiles, en línea con los objetivos de eficiencia energética y mitigación del cambio climático establecidos en la Estrategia Energética Nacional y la Ley Marco de Cambio Climático.

El objetivo principal es demostrar porque las bombas de calor constituyen una concreta solución energéticamente eficiente, económicamente rentable y ambiental permisible. Cuya viabilidad permita reemplazar calderas convencionales, así como otras tecnologías aplicadas en distintos contextos térmicos. Para ello, se realiza una caracterización de la demanda térmica nacional y sus sectores, con especial foco en aquellas regiones de alta potencia térmica declarada de instalaciones.

Entre las actividades desarrolladas, consideramos el análisis del estado del arte, abordando avances tecnológicos en bombas de alta temperatura, el uso de refrigerantes naturales y capacidades de implementar. Además, se construyen comparaciones técnicas, económicas y ambientales, frente a calderas tradicionales de gas licuado de petróleo (GLP) y otros equipos.

Identificaremos barreras regulatorias, técnicas y financieras que afectan la adopción de esta tecnología. Se revisan también políticas de incentivo vigentes y casos reales de implementación en Chile para sector residencial e industrial.

Como evolución de tecnología, las bombas de calor permiten alcanzar coeficientes de desempeño (COP) entre 3 y 5, con una significativa reducción del consumo energético final y de emisiones de CO₂. En escenarios industriales con demanda térmica estable, los períodos de retorno de inversión oscilan entre 3 y 6 años. A nivel residencial, la rentabilidad depende de la tarifa eléctrica y en industrias un bajo Opex permite mayor competencia.

Se concluye que la electrificación térmica mediante tecnología bombas de calor representa una alternativa clave para lograr reemplazar la actual matriz energética de carácter fósil, por una nueva matriz productora térmica de carácter eléctrico, con gran amplitud de capacidad termo energética, convirtiéndose en la tecnología más ecológica del mercado, eficiente y resiliente.

Su aceleración enfrenta una barrera muy importante de abordar, requiere de planificación sectorial en los sistemas de distribución nacional, ya que hoy el 91% del sector productivo térmico se encuentra en la zona central del país, para ello será fundamental comprender el alcance de la Reforma de distribución que hoy se encuentra en el congreso, de tal manera de aportar mediante la presente al fortalecimiento de medidas que pudiesen ser consideradas de analizar a modo de lograr los incentivos públicos y educación técnica para sectores productivos, solo de tal manera sería posible garantizar su masificación en el corto y mediano plazo.

ABSTRACT

Through this thesis, we will learn about heat pump technology. We will use it to evaluate the technical and economic feasibility of electrifying thermal processes for hot water generation using heat pumps, considering both industrial and residential applications in Chile. This initiative is part of the challenge of decarbonizing the thermal sector, traditionally dependent on fossil fuels, in line with the energy efficiency and climate change mitigation objectives established in the National Energy Strategy and the Framework Law on Climate Change.

The main objective is to demonstrate why heat pumps represent a concrete, energy-efficient, economically profitable, and environmentally acceptable solution. Their viability allows them to replace conventional boilers, as well as other technologies applied in different thermal contexts. To this end, we will characterize the national thermal demand and its sectors, with a special focus on regions with high declared thermal capacity for installations.

Among the activities developed, we will consider the state-of-the-art analysis, addressing technological advances in high-temperature pumps, the use of natural refrigerants, and implementation capabilities. In addition, technical, economic, and environmental comparisons are made with traditional liquefied petroleum gas (LPG) boilers and other equipment.

We will identify regulatory, technical, and financial barriers affecting the adoption of this technology. We also review current incentive policies and real-life implementation cases in Chile for the residential and industrial sectors.

As a technological evolution, heat pumps achieve coefficients of performance (COP) between 3 and 5, with a significant reduction in final energy consumption and CO₂ emissions. In industrial scenarios with stable thermal demand, the return on investment periods range from 3 to 6 years. At the residential level, profitability depends on the electricity rate, and in industrial settings, low OPEX allows for greater competition.

It is concluded that thermal electrification using heat pump technology represents a key alternative for replacing the current fossil-based energy matrix with a new electric-based thermal production matrix with a wide range of thermal energy capacity, making it the most environmentally friendly, efficient, and resilient technology on the market. Its acceleration faces a very important barrier to address, it requires sectoral planning in national distribution systems, since today 91% of the



thermal production sector is located in the central zone of the country. To achieve this, it will be essential to understand the scope of the Distribution Reform that is currently in Congress, in order to contribute through this to the strengthening of measures that could be considered for analysis in order to achieve public incentives and technical education for productive sectors. Only in this way would it be possible to guarantee its massification in the short and medium term.

GLOSARIO

MEE	Magíster en Economía Energética
DIMEC	Departamento de Ingeniería Mecánica
USM	Universidad Técnica Federico Santa María
IEA	Agencia de Energía Internacional
COP	Coeficiente de Desempeño
HTHP	Bombas de calor de alta temperatura
ACS	Agua Caliente Sanitaria
MP	Material particulado
PRI	Periodo de recuperación de inversión
ROI	Retorno de la inversion

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

El uso de bombas de calor es una solución prometedora para la electrificación de procesos térmicos, facilitando la transición hacia un sector industrial más sostenible. Muchas industrias pueden beneficiarse de la adopción de estas tecnologías, que no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también ayudan a alcanzar objetivos climáticos críticos. Desarrollar un marco que apoye la inversión en estas tecnologías será esencial para su éxito en la descarbonización industrial.

La descarbonización de los procesos industriales representa uno de los principales desafíos en la lucha contra el cambio climático. A nivel global, una fracción significativa del consumo energético industrial corresponde a procesos térmicos — principalmente generación de agua caliente y vapor— que históricamente han dependido de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo o el carbón. Esta dependencia no solo implica un alto nivel de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), sino también una exposición creciente a la volatilidad de precios y a las exigencias regulatorias ambientales.

En este contexto, las bombas de calor han emergido como una tecnología estratégica para la electrificación de procesos térmicos, permitiendo reemplazar fuentes térmicas fósiles por energía eléctrica limpia y eficiente. Estas tecnologías permiten transferir calor desde fuentes de baja temperatura — como el aire ambiente, aguas residuales o energía geotérmica — hacia puntos de mayor temperatura, utilizando electricidad como fuente de energía primaria. Su rendimiento se mide a través del coeficiente de desempeño (COP), que en condiciones óptimas puede superar con creces el de los sistemas tradicionales.

La ecuación general para el cálculo del COP es:

$$COP = \frac{Q}{W}$$

Donde:

- Q corresponde a la energía térmica producida.
- W corresponde a la energía eléctrica consumida.

Por ejemplo, un COP = 3 significa que la bomba de calor entrega 3 kWh de calor útil por cada 1 kWh de electricidad consumida. Cuanto mayor sea el COP, más eficiente es el sistema.

Factores que afectan el COP:

- I. Temperatura de entrada y salida (fuente y sumidero)
- II. Diferencia térmica (cuanto menor, mejor rendimiento)
- III. Tipo de refrigerante y tecnología del compresor
 - Condiciones climáticas (en bombas aire-agua)

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía [IEA, 2022] y el Fraunhofer ISI (2021), entre el 50% y el 70% de la demanda térmica industrial global podría electrificarse mediante bombas de calor, especialmente en aplicaciones de baja y media temperatura (60–150 °C). Países como Alemania, Países Bajos, Japón y Finlandia han liderado esta transformación mediante políticas públicas ambiciosas y soluciones tecnológicas avanzadas, como bombas de calor de alta temperatura (HTHP), ciclos híbridos y redes de calor inteligentes.

En Chile, los procesos térmicos industriales — particularmente en los sectores minero, acuícola, alimentario y residencial— siguen dependiendo en gran medida de combustibles fósiles. No obstante, el país ha comenzado a transitar hacia una matriz energética más sostenible. Estrategias como el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022–2026 y la Estrategia Nacional de Calor y Frío (2021), impulsadas por el Ministerio de Energía, establecen metas claras para que el 80% de la energía térmica provenga de fuentes sostenibles hacia 2050. En este marco, las bombas de calor aparecen como una alternativa de alta eficiencia, bajo costo operativo y mínimo impacto ambiental.

Este informe tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica, energética, económica y ambiental de la electrificación de procesos térmicos — agua caliente y vapor — mediante el uso de bombas de calor, considerando aplicaciones tanto industriales como residenciales. La investigación abordará el estado del arte tecnológico, el análisis comparativo con tecnologías convencionales, estudios de casos reales y el marco normativo vigente, con especial énfasis en el potencial de implementación en el contexto chileno.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnico-económica, de la electrificación de procesos térmicos de agua caliente mediante el uso de bombas de calor, en aplicaciones industriales y residenciales, con énfasis en el contexto industrial chileno.

2.2 Objetivos Específicos

- **Analizar el estado del arte** de las bombas de calor aplicadas a procesos térmicos, considerando avances tecnológicos, rangos de operación y tipos de aplicaciones.
- **Caracterizar los requerimientos térmicos típicos** de procesos industriales y residenciales en los que puedan ser aplicadas bombas de calor, especialmente en los sectores con mayor intensidad energética.
- **Comparar el desempeño energético y ambiental** de las bombas de calor frente a tecnologías tradicionales (calderas a gas, electricidad directa), en términos de eficiencia, emisiones y costos operacionales.
- **Estudiar casos reales y simulaciones** de implementación de bombas de calor, tanto a nivel nacional como internacional, evaluando indicadores como COP, ahorro energético, reducción de CO₂ y retorno de inversión.
- **Identificar barreras y oportunidades** para la masificación de esta tecnología en Chile, considerando aspectos técnicos, económicos y regulatorios.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología se estructura en varias fases interrelacionadas que garantizan un análisis integral de la viabilidad técnico-económica de las bombas de calor para la electrificación de procesos térmicos en Chile. Inicialmente, se realizará una revisión bibliográfica y documental que permita caracterizar el estado del arte de la tecnología, incluyendo avances recientes, mejores prácticas internacionales y la normativa vigente, a partir de informes de organismos internacionales, fabricantes, documentación técnica y fuentes gubernamentales. Paralelamente, se recopilarán datos primarios y secundarios sobre los requerimientos térmicos en aplicaciones industriales y residenciales, abarcando parámetros de consumo energético, rangos de temperatura, costos operativos y coeficientes de desempeño (COP), mediante la consulta de fuentes oficiales, estudios de caso y entrevistas a expertos del sector. Con estos datos se desarrollará un análisis comparativo entre las bombas de calor y las tecnologías térmicas convencionales, evaluando sus ventajas y limitaciones en términos técnicos, económicos y ambientales. A continuación, se implementarán modelos de simulación que proyecten el desempeño de las bombas de calor en diversos escenarios y perfiles de demanda; estos modelos permitirán cuantificar el potencial ahorro energético, la reducción de emisiones de CO₂, el retorno de inversión (PRI) y otros indicadores económicos relevantes. Asimismo, se analizarán estudios de caso internacionales y locales, identificando experiencias exitosas y obstáculos superados en proyectos piloto y programas gubernamentales, para contrastar y validar los resultados obtenidos por simulación. Finalmente, la integración de los hallazgos se realizará mediante una evaluación que combine los aspectos técnicos, ambientales y económicos, de modo que se identifiquen las principales barreras, oportunidades y estrategias para una adopción masiva de la tecnología en el mercado chileno. Este enfoque metodológico, ofrece un marco robusto y holístico que servirá de base para fundamentar la toma de decisiones y promover futuras inversiones en la electrificación de procesos térmicos mediante bombas de calor en Chile.

4. CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

4.1.1 Descarbonización y eficiencia energética.

La descarbonización es el proceso de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero (GEI) en los sectores industriales, residenciales, de transporte y energía, con el objetivo de mitigar el cambio climático. Este proceso es crucial para alcanzar los compromisos globales de neutralidad de carbono para el año 2050, tal como se estipula en el acuerdo de París.

Uno de los pilares de la descarbonización es la eficiencia energética, que se refiere al uso más eficiente de la energía para realizar un trabajo determinado, reduciendo las pérdidas de energía. En el sector industrial, muchas de las emisiones provienen de procesos térmicos, como la generación de agua caliente, vapor o calor para procesos de producción. Aquí, la electrificación de procesos térmicos es clave, ya que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles, utilizando tecnologías limpias como las bombas de calor.

Las bombas de calor permiten aprovechar fuentes de energía renovable y no contaminante (como energía geotérmica o energía del aire ambiente) para generar calor de manera más eficiente, permitiendo reducir el consumo de energía primaria y las emisiones de CO_2 en los procesos térmicos industriales y residenciales.

4.1.2 Electrificación térmica de procesos

La electrificación de procesos térmicos industriales es una estrategia central para alcanzar los objetivos de descarbonización energética. Reemplazar calderas y sistemas térmicos alimentados por combustibles fósiles por tecnologías eléctricas como las bombas de calor permite reducir drásticamente las emisiones de CO_2 asociadas a la generación de calor.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022), entre el 50% y el 70% de la demanda térmica industrial mundial puede ser electrificada, dependiendo del rango de temperatura requerido. Esta posibilidad se concentra principalmente en procesos de baja y media temperatura (entre $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $150\text{ }^{\circ}\text{C}$), presentes en sectores como el alimentario, químico, textil y papelerero.

En Europa, el plan RePowerEU (Comisión Europea, 2022) propone duplicar la tasa de adopción de bombas de calor al año 2030 como parte de la estrategia para reducir la dependencia del gas fósil. Esta electrificación es facilitada por el

despliegue creciente de energías renovables, que permiten alimentar los sistemas térmicos con electricidad de bajo impacto ambiental.

En Chile, los procesos térmicos representan cerca del 40% del consumo energético industrial, con una fuerte dependencia de gas natural, petróleo diésel y GLP. Sin embargo, políticas como la Estrategia Nacional de Calor y Frío (Ministerio de Energía, 2021) establecen una hoja de ruta para que el 80% del calor provenga de fuentes sostenibles al 2050, promoviendo la electrificación térmica como eje estratégico.

4.1.3 Ventajas de la electrificación de procesos térmicos

La electrificación de procesos térmicos ofrece diversas ventajas en términos de eficiencia y sostenibilidad:

1. **Reducción de emisiones:** Al sustituir calderas a gas, diésel o carbón por bombas de calor, se eliminan o reducen significativamente las emisiones de CO₂ asociadas con la generación de calor. La electrificación permite que la energía eléctrica provenga de fuentes renovables como la solar o eólica, lo que contribuye directamente a la descarbonización de la industria y el sector residencial.
2. **Mejor eficiencia energética:** Las bombas de calor tienen un coeficiente de rendimiento (COP) que puede superar 3, lo que significa que, por cada unidad de energía eléctrica consumida, se pueden generar hasta tres unidades de calor. Esta alta eficiencia las hace una alternativa mucho más rentable y energética comparada con sistemas de calefacción tradicionales.
3. **Reducción de costos operacionales:** Aunque las bombas de calor requieren una inversión inicial considerable, su bajo consumo energético y costos operativos más bajos en comparación con sistemas tradicionales de calefacción, permiten obtener retornos de inversión (ROI) positivos a largo plazo, especialmente en sectores industriales de alta demanda térmica.
4. **Integración con fuentes de calor renovable:** La electrificación de los procesos térmicos permite integrar sistemas de energía renovable, como geotermia, solar térmica o recuperación de calor residual en los sistemas de calefacción, lo que potencia aún más la sostenibilidad de las soluciones térmicas.

5. TECNOLOGÍA BOMBAS DE CALOR

5.1.1 Bombas de calor aplicadas a procesos térmicos

Las **bombas de calor (BBC)** han evolucionado desde soluciones domésticas de calefacción hacia tecnologías robustas, escalables y altamente eficientes para **procesos térmicos industriales**. Su aplicación en la industria responde tanto a imperativos ambientales como a oportunidades económicas asociadas a la eficiencia energética.

Rangos de operación térmica para bombas de calor

El desempeño de las bombas de calor varía según el **tipo de fuente térmica**, el **fluido refrigerante** y la **temperatura objetivo**. Se pueden clasificar según el rango de salida térmica:

Tipo de BdC	Rango de temperatura (°C)	COP típico	Aplicaciones
Aire-agua	40 °C – 90 °C	3.0 – 5.0	Agua caliente, limpieza, calefacción
Agua-agua (fuente estable)	60 °C – 120 °C	3.5 – 6.0	Pasteurización, precalentamiento
Alta temperatura (HTHP)	100 °C – 180 °C	1.5 – 3.0	Vapor de proceso, esterilización
CO ₂ transcrítico	hasta 100 °C	2.5 – 4.5	Procesos alimentarios, calefacción
Termocompresión de vapor	110 °C – 180 °C (hasta 12 bar)	1.5 – 2.5	Recompresión de vapor industrial

Fuente: Adaptado de Fraunhofer ISI (2021), Oilon (2023), IEA (2022)

Tipos de aplicaciones según sector

El tipo de bomba de calor adecuada depende directamente del **sector industrial** y de las **características térmicas del proceso**. A continuación, se detallan las principales aplicaciones:

- **Alimentación y bebidas:** secado, pasteurización, cocción, lavado. Requieren entre 60–120 °C. Muy compatibles con BBC aire-agua y agua-agua.
- **Químico y farmacéutico:** destilación, esterilización, cristalización. Exigen 100–160 °C. Requieren HTHP o termocompresión.

- **Minería y metalurgia:** calentamiento de agua sanitaria, climatización, procesos auxiliares. Viables con sistemas agua-agua o geotérmicos.
- **Textil y papelerero:** secado y tratamiento térmico. Exigen calor continuo y eficiente, donde las BBC con recuperación térmica son especialmente útiles.
- **Sector residencial y comercial:** agua caliente sanitaria, calefacción por suelo radiante o fan coils. Las bombas de calor aire-agua son predominantes en este segmento, con gran proyección en edificios multifamiliares y hospitales.

Compatibilidad con fuentes térmicas residuales

Un aspecto cada vez más relevante en la aplicación industrial de bombas de calor es su **capacidad de utilizar calor residual de procesos existentes**, como:

- Efluentes líquidos templados (aguas grises, industriales).
- Calor de escape de compresores, motores o calderas.
- Energía geotérmica somera (hasta 200 m de profundidad).

Esto permite reducir aún más la **demandas de energía primaria** y maximizar la eficiencia energética global de los sistemas térmicos industriales y residenciales.

5.1.2 Bombas de calor industriales

Las bombas de calor son dispositivos que utilizan un ciclo termodinámico para transferir calor desde una fuente de baja temperatura a un medio de mayor temperatura. Su eficiencia se expresa mediante el **Coeficiente de Desempeño (COP)**, que representa la cantidad de energía térmica entregada por cada unidad de energía eléctrica consumida.

Las principales tipologías industriales incluyen:

- **Aire-agua:** simples y de bajo costo, aunque menos eficientes en climas fríos.
- **Agua-agua:** utilizan fuentes térmicas estables como aguas residuales o geotermia, con COP superiores a 4.5.
- **Alta temperatura (HTHP):** alcanzan hasta 180 °C, utilizando refrigerantes como CO₂ o R1233zd(E).

- **CO₂ transcrítico:** adecuadas para procesos alimentarios, permiten generar agua caliente hasta 100 °C de forma eficiente.

5.1.3 Avances tecnológicos recientes

En los últimos años, la evolución de las bombas de calor ha estado marcada por:

- **El desarrollo de bombas de alta temperatura (HTHP)** capaces de generar calor útil por sobre los **160 °C**, con aplicaciones en industrias que requieren vapor o procesos de secado exigentes.
- **El uso de refrigerantes naturales**, como el **CO₂ (R744)** o **R1234ze(E)**, que permiten trabajar a altas temperaturas con bajo impacto ambiental, cumpliendo además con regulaciones internacionales sobre gases de efecto invernadero.
- **Sistemas híbridos e integrados**, como la **recompresión de vapor** y la **recuperación de calor residual**, que permiten incrementar aún más la eficiencia global de los procesos térmicos.
- **Mejoras en control y automatización**, mediante sensores, IoT e inteligencia artificial, que optimizan el rendimiento operativo en tiempo real.

Avances tecnológicos en bombas de calor de alta temperatura han sido desarrollados por fabricantes entre los que señalaremos tres principales importantes actores del mercado, son el caso de MAN Energy Solutions, Oilon y GEA.

Empresas como MAN Energy Solutions han desarrollado bombas que alcanzan los 280 °C utilizando CO₂, mientras que fabricantes como Oilon (2023) y GEA han lanzado soluciones con rangos entre 120 °C y 160 °C, lo cual antes era territorio exclusivo de calderas fósiles.

La posibilidad de alcanzar temperaturas por sobre los 150 °C con bombas de calor representa un avance tecnológico notable, ya que históricamente estos rangos estaban reservados para calderas alimentadas por gas natural, diésel o vapor. Sin embargo, innovaciones recientes en compresión, materiales y refrigerantes han permitido a empresas romper esa barrera.

Fabricante Oilon

Oilon es una empresa familiar finlandesa fundada en 1961, especializada en tecnología energética y medioambiental. Su enfoque principal está en el desarrollo de soluciones sostenibles que reduzcan las emisiones y mejoren la eficiencia energética. Tiene presencia global con fábricas en Finlandia, EE. UU. y China, y una red de distribución en más de 60 países.

Bombas de calor Oilon ChillHeat

Las bombas de calor ChillHeat de Oilon están diseñadas para aplicaciones industriales exigentes, incluyendo calefacción urbana, procesos industriales, recuperación de calor residual y climatización. Utilizan refrigerantes HFC y HFO con bajo potencial de calentamiento global (GWP), y permiten producción simultánea de calefacción y refrigeración.

Principales líneas de producto

Serie equipos	Rango de potencia	Temperatura máxima	Aplicaciones destacadas
P30 – P450	30 – 1.000 kW	Hasta 120 °C	Procesos industriales, calefacción urbana ³
S180 – S580	100 – 1.000 kW	Hasta 85 °C	Recuperación de calor de procesos, refrigeración de agua
S600 – S2000	1.000 – 4.000 kW	Hasta 85 °C	Grandes propiedades, refrigeración exigente
RE210 – RE420	100 – 1.000 kW	Hasta 62 °C	Aplicaciones geotérmicas, calefacción de espacios

Características técnicas destacadas

- Alta eficiencia energética: COP entre 3 y 6, dependiendo de la aplicación.
- Capacidad de modularidad: Se pueden conectar en serie para aumentar potencia o temperatura.
- Automatización avanzada: Supervisión remota mediante el sistema Oilon Global Monitor.
- Aplicaciones híbridas: Ideales para sistemas de economía circular, aprovechando calor residual de aguas, aire o gases de combustión¹.

Fabricante GEA

GEA Group AG es una empresa alemana líder mundial en tecnologías de procesos y soluciones para la industria alimentaria, farmacéutica, energética y medioambiental. Fundada en 1881, GEA se especializa en ingeniería térmica, refrigeración industrial y automatización, con un fuerte enfoque en la eficiencia energética y la descarbonización de procesos industriales.

GEA ofrece una gama de bombas de calor industriales diseñadas para aplicaciones exigentes como calefacción urbana, recuperación de calor residual, procesos térmicos industriales y soluciones híbridas de refrigeración-calefacción.

Principales líneas de productos

Modelo / Serie	Tipo	Rango de temperatura	Capacidad térmica	Aplicaciones
GEA RedAstrum	Agua glicolada / agua (geotérmica)	+55 °C a +80 °C	650 – 2.910 kW	Calefacción urbana, procesos industriales, recuperación de calor residual
GEA Blu-Red Fusion	Híbrida (refrigeración + calor)	Hasta 80 °C	Variable según configuración	Integración de refrigeración y calefacción en un solo sistema
GEA RedGenium	Amoníaco, compresor de tornillo	Hasta 70 °C	300 – 1.500 kW (aprox.)	Procesos industriales, calefacción de edificios, recuperación de calor
Bombas de calor abiertas	Integradas a sistemas existentes	Variable	Según diseño personalizado	Recuperación de calor desde condensadores de plantas de refrigeración

Características técnicas destacadas

- Uso de refrigerantes naturales, como amoníaco (NH₃), con bajo impacto ambiental
- Alta eficiencia energética, con COP elevados y rápida amortización
- Diseño modular y personalizado para adaptarse a condiciones específicas

del cliente

- Capacidad de integración con sistemas de refrigeración existentes
- Amplio rango de temperaturas de entrada y salida, ideal para fuentes de calor residual como aguas residuales, aire ambiente o gases industriales

Enfoque en sostenibilidad

GEA promueve activamente la descarbonización del calor industrial, con casos de éxito como:

- Recuperación de calor del metro de Londres para calefacción urbana.
- Reducción del 80 % de emisiones en plantas lácteas en Irlanda.
- Integración de bombas de calor en plantas de procesamiento de alimentos y bebidas.

Fabricante **industrial MAN Energy Solutions**

MAN Energy Solutions es una empresa alemana con sede en Augsburg, subsidiaria del Grupo Volkswagen. Históricamente reconocida por su ingeniería en motores diésel y turbo maquinaria, en los últimos años ha evolucionado hacia soluciones energéticas sostenibles, incluyendo bombas de calor industriales de gran escala. Su enfoque está en la descarbonización de procesos térmicos y la integración de energías renovables en sistemas urbanos e industriales.

Bombas de calor MAN: Tecnología y aplicaciones

MAN ha desarrollado bombas de calor de gran capacidad para calefacción urbana, procesos industriales y almacenamiento térmico. Su tecnología se basa en el sistema ETES (Electro-Thermal Energy Storage), que permite generar calor, frío y electricidad a partir de fuentes renovables.

Ejemplos de proyectos y capacidades

Proyecto / Modelo	Tipo de bomba de calor	Rango de temperatura	Capacidad térmica	Aplicaciones
Esbjerg, Dinamarca	Agua de mar / CO ₂	Hasta 90 °C	50 MW	Calefacción urbana para 100.000 personas
Helsinki, Finlandia (Patola)	Aire-agua / CO ₂	-20 °C a 90 °C	20 – 33 MW	Calefacción urbana para 30.000 hogares
Ludwigshafen, Alemania (BASF)	Recuperación de calor residual	Hasta 120 °C (estimado)	>50 MW	tCO ₂ /año en procesos

Características técnicas destacadas

- Refrigerante natural CO₂ (R-744): no tóxico, sin impacto ambiental significativo.
- Alta eficiencia energética: COP elevados, incluso a bajas temperaturas exteriores.
- Compresores HOFIM®: herméticos, sin aceite, con cojinetes magnéticos activos.
- Capacidad de integración con energías renovables (eólica, solar).
- Producción simultánea de calor y frío, o conversión de calor en electricidad.
- Diseño modular y escalable, adaptable a redes térmicas existentes.

Enfoque en sostenibilidad

MAN Energy Solutions busca reemplazar sistemas de calefacción basados en combustibles fósiles con soluciones neutras en carbono, utilizando fuentes como el aire ambiente, agua de mar o calor residual industrial. Sus bombas de calor permiten:

- Reducción masiva de emisiones de CO₂ (hasta 390.000 t/año en algunos casos)
- Estabilidad de precios energéticos gracias a la electrificación
- Flexibilidad operativa para equilibrar la red eléctrica

6. CAPITULO 2: IMPLEMENTACIÓN GLOBAL

6.1 Casos internacionales de implementación de bombas de calor.

A nivel internacional, países como Alemania, Países Bajos y Japón han liderado la implementación de bombas de calor para procesos térmicos industriales y residenciales, destacándose en sectores como la industria alimentaria, química y textil. Estos países han promovido políticas públicas y marcos regulatorios favorables, como el Plan de Energía Verde Europeo (RePowerEU) y los subsidios a la eficiencia energética, para acelerar la adopción de tecnologías limpias.

Destacan experiencias como:

- **Nestlé (Suiza):** bomba de calor agua-agua con COP 3.2, ahorro de 950 tCO₂/año.
- **Heineken (Países Bajos):** bomba de calor HTHP para pasteurización, ahorro energético del 40% y COP 3.5.
- **Planta papelera (Alemania):** bomba de calor integrada a sistema de recuperación térmica, temperatura hasta 150 °C.

Impacto en el sector industrial

Además del sector residencial, estas políticas están dirigidas al ámbito industrial, donde se están financiando proyectos de bombas de calor de alta temperatura (HTHP) para procesos en sectores como el alimentario, farmacéutico y químico. Países como Alemania, Países Bajos y Finlandia lideran en instalación y fabricación de estas tecnologías de vanguardia.

6.2 Casos nacionales de implementación de bombas de calor.

En Chile, la Estrategia Nacional de Calor y Frío promueve la electrificación térmica mediante el uso de bombas de calor, especialmente en sectores como la industria minera, agroalimentaria y residencial. El país ha comenzado a implementar programas de recambio tecnológico, buscando sustituir calderas de gas y estufas a leña por alternativas más sostenibles. En sectores residenciales, las bombas de calor aire-agua están siendo implementadas para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) y la calefacción de espacios, reduciendo significativamente las emisiones de material particulado (MP) y CO₂.

En **Chile**, destacan los siguientes casos:

- **Hendrix Genetics (Curarrehue):** bomba geotérmica con COP 12, reduciendo consumo energético en piscicultura (GEOTERMIKA, 2024).
- **Minera Antucoya:** reducción de 515 tCO₂/año y ahorro de 1.231 MWh mediante bomba de calor para agua caliente sanitaria.
- **Industria láctea:** proyectos piloto orientados a sustituir calderas fósiles por bombas de calor (Ozono MMA, 2023).
- **Sector residencial (Viña del Mar):** sustitución de caldera mural por bomba aire-agua con COP 3.2, logrando un ahorro del 62% en emisiones de CO₂ y un PRI de 6,9 años (Climatización Sustentable, 2024).

6.3 Aplicaciones industriales industria nacional

Las bombas de calor encuentran aplicaciones especialmente rentables en sectores con demandas térmicas constantes y con potencial de recuperación de calor residual. Algunos ejemplos destacados incluyen:

- **Industria Inmobiliaria:** producción de agua caliente sanitaria, calefacción centralizada.
- **Industria alimentaria:** procesos como pasteurización, cocción, limpieza y secado operan en rangos de 60–120 °C, ideales para bombas de calor aire-agua o agua-agua.
- **Industria farmacéutica y química:** requieren calor entre 100 °C y 160 °C para esterilización, síntesis química o evaporación, donde las HTHP son más adecuadas.
- **Industria papelera:** uso intensivo de calor para secado y blanqueo de pulpa, con potencial de integración de sistemas de recuperación térmica.
- **Industria minera:** en Chile, aplicaciones para agua caliente sanitaria y climatización de instalaciones ya están siendo evaluadas.

6.4 Desafíos tecnológicos y económicos

A pesar de su eficiencia y potencial ambiental, la electrificación térmica mediante

bombas de calor enfrenta diversos desafíos:

- **Sistema**, limitaciones en sistema eléctrico nacional para las potencias requeridas en implementación.
- **Inversión inicial elevada (CAPEX)**: aunque sus costos operacionales son bajos, la inversión inicial sigue siendo una barrera importante.
- **Eficiencia limitada a altas temperaturas**: el COP disminuye a medida que se incrementa el salto térmico requerido (diferencia entre la fuente y el sumidero de calor).
- **Disponibilidad de fuentes térmicas**: el desempeño óptimo depende del acceso a fuentes estables (agua subterránea, geotermia, aguas residuales).
- **Desafíos normativos y técnicos**: la falta de estandarización y formación técnica especializada puede dificultar la adopción en ciertas industrias.

No obstante, tecnologías emergentes como la termocompresión de vapor o los ciclos híbridos con recuperación de calor están comenzando a superar estas limitaciones.

7. CAPITULO 3: PRODUCCIÓN TÉRMICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL EN CHILE

El sector residencial en Chile representa un actor clave en el consumo energético nacional, particularmente en el uso de energía para producción térmica. Este uso se concentra principalmente en tres fines esenciales: calefacción de espacios, agua caliente sanitaria (ACS) y, en menor medida, cocción. Estas demandas térmicas tienen un alto impacto en el consumo total de energía de los hogares y constituyen un objetivo prioritario para la política energética nacional.

7.1.1 Importancia del consumo térmico residencial

Según la Caracterización del Consumo Energético Residencial (Ministerio de Energía, 2018), el 58% del consumo energético de los hogares está destinado a calefacción de espacios, seguido por un 24% para agua caliente sanitaria, y un 13% para cocción. Estas cifras revelan que más del 80% de la energía consumida en el hogar tiene una finalidad térmica.

El consumo promedio anual por vivienda alcanza los 8.083 kWh, y aunque existe una amplia variabilidad geográfica y socioeconómica, los mayores consumos térmicos se concentran en las regiones del centro-sur del país (Araucanía, Biobío,

Los Ríos, Los Lagos), donde las bajas temperaturas y el uso de sistemas ineficientes como estufas a leña intensifican la demanda.

7.1.2 Fuentes energéticas predominantes

La producción térmica en el sector residencial chileno se abastece actualmente de una matriz energética diversificada, pero mayormente contaminante:

- **Leña y biomasa:** Sigue siendo la principal fuente para calefacción en el sur del país, utilizada por más del 70% de los hogares en regiones como La Araucanía y Los Ríos. Aunque es percibida como una fuente “renovable”, su combustión ineficiente genera altos niveles de material particulado (MP2.5), impactando la salud pública y la calidad del aire.
- **Gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural:** Muy utilizado en zonas urbanas para calefacción, cocción y agua caliente. Aunque tiene menor huella ambiental que la leña, sigue siendo un **combustible fósil**, con emisiones asociadas a su combustión y riesgos de dependencia energética externa.
- **Electricidad:** Utilizada principalmente en calefactores eléctricos y termos de resistencia, pero con baja eficiencia térmica. No obstante, su uso ha aumentado debido a la **electrificación progresiva** de las viviendas, especialmente en nuevas construcciones y edificios en altura.
- **Bombas de calor:** Aún con baja penetración, están ganando terreno en proyectos de **edificación sustentable**, especialmente en regiones metropolitanas y costeras. Destacan por su **alto rendimiento energético (COP >3)** y su capacidad para reducir tanto **costos operacionales** como **emisiones de CO₂**.

7.2 Tendencias hacia la transición energética

El comportamiento residencial en términos térmicos está en transformación, impulsado por políticas públicas y una mayor conciencia sobre los impactos del cambio climático y la contaminación local:

- La **Estrategia de Transición Energética Residencial** promueve el recambio tecnológico hacia **sistemas térmicos limpios y eficientes**, como bombas de calor aerotérmicas, solar térmica y calefactores certificados.

- Programas como **"Casa Solar"** o **"Recambio de Calefactores"** entregan subsidios para reemplazar tecnologías contaminantes por sistemas eléctricos eficientes o tecnologías renovables.
- Nuevos proyectos inmobiliarios y de vivienda social están incorporando **bombas de calor para ACS y climatización centralizada**, especialmente en zonas urbanas de alto crecimiento como Santiago, Valparaíso y Concepción.

7.3 Evaluaciones técnicas y económicas

Estudios de caso recientes han demostrado que, en el sector residencial:

- Las bombas de calor pueden reducir **hasta un 60% el consumo energético térmico** en comparación con calderas a gas o calentadores eléctricos.
- El retorno de inversión (PRI) se sitúa entre **5 y 7 años**, dependiendo del tamaño del sistema y la tarifa eléctrica aplicada.
- Las emisiones de CO₂ por vivienda pueden reducirse de **más de 1.000 kg/año a menos de 300 kg/año**, aportando significativamente a la mitigación del cambio climático a escala urbana.

7.4 Requerimientos térmicos en procesos industriales y residenciales para la aplicación de bombas de calor

Las **bombas de calor** se presentan como una solución eficiente y sostenible para satisfacer las demandas térmicas de diversos procesos, tanto industriales como residenciales. Sin embargo, para determinar la viabilidad de su implementación, es crucial caracterizar los **requerimientos térmicos específicos** de cada tipo de proceso o aplicación, tanto en términos de **temperatura, capacidad térmica y fuentes de calor disponibles**.

7.4.1 Requerimientos térmicos en procesos industriales

El sector industrial es uno de los mayores consumidores de energía térmica, ya que muchas industrias requieren calor continuo o discontinuo para realizar una variedad de procesos, como el secado, pasteurización, esterilización, evaporación, calefacción de espacios, entre otros. Los rangos de temperatura necesarios en estos procesos varían dependiendo de la naturaleza del proceso y de las características del producto final.

Sectores industriales con alta demanda térmica:

- **Industria inmobiliaria:**

En el sector residencial, los requerimientos térmicos están principalmente asociados a la calefacción de ambientes y al suministro de agua caliente sanitaria (ACS), con temperaturas típicas de operación que fluctúan entre los 40 °C y los 60 °C. Estos procesos, si bien menos intensivos que en la industria alimentaria, representan una fracción significativa del consumo energético total de las viviendas. El uso de bombas de calor resulta altamente eficiente para cubrir estas necesidades, ya que aprovechan fuentes de energía de baja entalpía, como el aire ambiente o aguas grises, reduciendo las emisiones y mejorando el rendimiento energético en comparación con tecnologías convencionales.

- **Industria alimentaria:**

Los procesos de pasteurización, secado, cocción y blanqueo de alimentos requieren temperaturas en el rango de 60 °C a 120 °C. Las bombas de calor de baja y media temperatura son ideales para estos procesos, ya que permiten transferir calor desde fuentes a baja temperatura (como aguas residuales) hacia los procesos térmicos, maximizando la eficiencia.

- **Industria química y farmacéutica:**

La esterilización, cristalización y reacciones químicas a menudo requieren temperaturas más altas, entre 100 °C y 150 °C. Las bombas de calor de alta temperatura (HTHP), capaces de alcanzar temperaturas de hasta 160 °C, son especialmente útiles para estas aplicaciones, permitiendo reducir el uso de calderas a gas y otros sistemas de calefacción térmica más contaminantes.

- **Industria minera:**

El calor en la minería se utiliza para procesos como la calefacción de agua sanitaria y la climatización de espacios. En estos casos, se requiere agua caliente a temperaturas que varían entre 40 °C y 70 °C. Las bombas de calor geotérmicas o de aire-agua son eficientes en este tipo de aplicaciones debido a la disponibilidad de fuentes térmicas constantes, como el calor geotérmico o el aire ambiente.

- **Industria papelera y del textil:**

El secado de pulpa, tela o papel es un proceso que consume grandes cantidades de calor. Las temperaturas requeridas en estos procesos oscilan entre 80 °C y 150 °C, y las bombas de calor de alta temperatura (HTHP) son la opción más viable para estos sectores, especialmente cuando la industria ya dispone de calor residual para ser recuperado y reutilizado.

Requerimientos comunes en procesos industriales:

- **Temperaturas:** Generalmente entre **60 °C y 150 °C**.
- **Capacidad térmica:** Dependiendo del tamaño de la instalación, los sistemas industriales pueden requerir capacidades de calor que varían de **decenas a cientos de MW**.
- **Fuentes de calor:** La **recuperación de calor residual**, **energía geotérmica** o **agua residual** son fuentes clave de entrada de baja temperatura para las bombas de calor.

7.4.2 Requerimientos térmicos en procesos residenciales

El **sector residencial** tiene demandas térmicas considerablemente menores que la industria, pero la magnitud del consumo energético a nivel global sigue siendo relevante, especialmente en calefacción, agua caliente sanitaria y algunas aplicaciones de refrigeración. La tendencia a la **electrificación** y la **adopción de tecnologías de bajo impacto ambiental** están transformando el comportamiento del consumidor y haciendo que las **bombas de calor** sean cada vez más atractivas.

Sectores residenciales con alta demanda térmica:

- **Agua caliente sanitaria (ACS):**

En los hogares, el ACS es uno de los principales requerimientos térmicos. Se necesitan temperaturas de **40 °C a 60 °C** para cubrir las demandas diarias de agua caliente en duchas, lavabos, cocina, entre otros. Las **bombas de calor aire-agua** son las más utilizadas en este ámbito, con **COPs elevados** que garantizan eficiencia energética y reducción de emisiones.

- **Calefacción de espacios:**

En países como Chile, especialmente en zonas del sur, la calefacción es esencial durante los meses fríos, con temperaturas de demanda térmica que oscilan entre **18 °C y 22 °C** en interiores. Las **bombas de calor aire-agua** o

geotérmicas pueden proporcionar calefacción de forma eficiente, aprovechando el aire exterior o fuentes geotérmicas para cumplir con los requisitos de temperatura.

Requerimientos comunes en el sector residencial:

- **Temperaturas:** En general, los hogares requieren **agua caliente entre 40 °C y 60 °C** y calefacción de espacios a temperaturas interiores de **18 °C a 22 °C**.
- **Capacidad térmica:** Las necesidades térmicas de un hogar promedio son relativamente pequeñas, oscilando entre **3 y 12 kW**, dependiendo del tamaño de la vivienda.
- **Fuentes de calor:** El **aire ambiente** o el **agua residual** pueden ser aprovechados por las bombas de calor, y las **bombas de calor geotérmicas** se están integrando en algunos proyectos de viviendas con diseño sustentable.

7.5 Oportunidades para la aplicación de bombas de calor

Las bombas de calor, debido a su alta eficiencia (COP superior a 3), se presentan como una opción estratégica en sectores residenciales e industriales, ya que permiten cubrir **hasta el 70% de la demanda térmica** mediante energía renovable, especialmente cuando se utilizan fuentes de calor residual, aire o geotermia. Esto se traduce en:

- **Reducción de costes operacionales** en comparación con sistemas de calefacción tradicionales (calderas a gas, eléctricos, etc.).
- **Disminución de las emisiones de CO₂**, haciendo que tanto la industria como los hogares sean más sostenibles.
- **Descarbonización de procesos térmicos industriales** que anteriormente dependían de fuentes fósiles.

8. CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO APLICACIÓN RESIDENCIAL

Se ha definido como comunidad de estudio aquella que reúna una serie de parámetros que nos permitan considerar un riesgo reducido de acuerdo al contrato. Para lograr aquella selección de posibles cliente, enfocamos nuestra atención en las siguientes bases de información:

- Antigüedad de constitución administrativa.
- Historial de pago en gastos comunes de comunidad.
- Buen comportamiento financiero.
- Sistema de ACS y calefacción mediante única instalación térmica productora.
- Personalidad jurídica para efectos legales.
- Encuesta de conocimiento información respecto a nuestra tecnología.

Respecto a las utilidades del proyecto, el Servicio de Impuestos Internos indica específicamente que *“la tasa general del Impuesto de Primera Categoría a aplicar a cualquiera renta clasificada en dicha categoría será de un 25%”*.

Perfiles de Demanda

Los perfiles de gasto de la “Comunidad Edificio Jardines de Noruega”, se estimaron en función de la información proporcionada por ellos, correspondiente a las facturas de servicio de los años 2016, 2017 y 2018. Estableciendo con ello un requerimiento energético mensual.

Se estimó en base a lo anterior, un consumo de gas natural proveniente de la empresa “METROGAS” tomando un perfil más actualizado al año 2022 y considerando la variación del IPC presentada en los años 2019, 2020, 2021 y 2022. El objetivo del estudio del perfil de gasto y consumo de la comunidad era poder estimar lo más certeramente los ahorros futuros que podría presentar nuestro proyecto implementado en sus instalaciones, tomando variables como el precio del combustible Gas Natural como la energía eléctrica para el uso de las bombas de Calor. La ilustración 5 hace referencia al perfil proyectado en base a los datos recolectados.

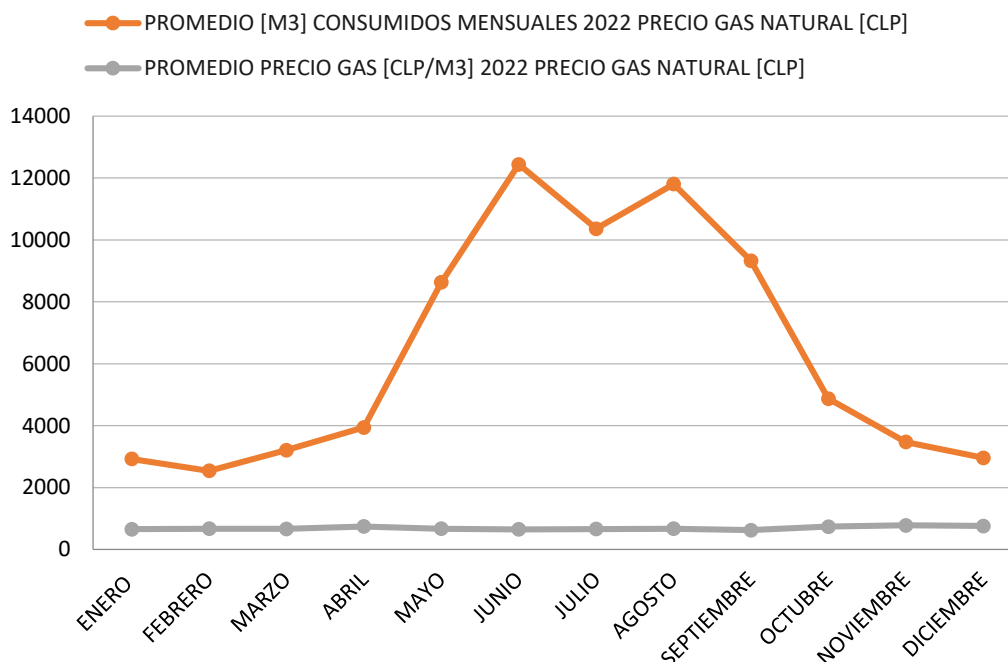


Ilustración 1. Gráfico del perfil de gasto Anual. Fuente. Elaboración Propia.

Costos de operación

Los costos de operación se analizan comparando el escenario actual con el proyectado para luego, a partir de eso, visualizar la proyección de ahorros.

Situación actual

La Comunidad evaluada se encuentra en proceso de renovación del contrato anual con proveedor de GLP, los costos asociados a la producción térmica corresponden a 1.463,23 UF anuales por concepto de energía térmica mediante el consumo de GLP.

COSTO ANUAL DE LA TECNOLOGÍA ACTUAL			
ID	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
1	Consumo de combustible	\$ 46.729.366	[CLP]
1	Consumo de combustible	UF 1.342,57	[UF]
2	Mantenición	\$ 4.200.000	[CLP]
2	Mantenición	UF 120,67	[UF]
3	Unidades térmicas por producir al año	\$ 732.100	[kWht]

4	Costo por kWh _t Producido	\$	75	[CLP/kWh _t]
---	--------------------------------------	----	----	-------------------------

Situación proyectada

La propuesta consiste en implementar 3 Bombas de Calor y 2 Acumuladores (estos últimos como respaldo a sistemas de acumulación existentes por eventual defecto futuro) reemplazando la totalidad de la capacidad térmica de la instalación. Los costos de operación en producción térmica corresponden a 737,42 UF anuales, la implementación conlleva un cambio de proveedor energético y nuevo contrato de suministro eléctrico.

COSTO ANUAL DE LA TECNOLOGÍA			
ID	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
1	Consumo de combustible	\$ 23.911.700	[CLP]
2	Consumo de combustible	UF 687,00	[UF]
2	Mantenimiento	\$ 1.755.000	[CLP]
3	Mantenimiento	UF 50,42	[UF]
3	Unidades térmicas por producir al año	\$ 685.326	[kWh _t]
4	Costo por kWh _t producido	\$ 38	[CLP/kWh _t]
5	Costo unitario de los equipos	UF 344,45	[UF]
6	Costos acumuladores	UF 127,92	[UF]

Los costos de mantenimiento e Instalación inmersos en estas partidas vienen dados por el índice de precios dado por la GIZ, en su informe, “Índice de precios Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile”, dando una mediana de su levantamiento de información del 30% del costo de los equipos y dando un nivel de mantenimiento de aproximadamente 0,15 UF por kW instalado, dando como resultado los valores mencionados en la tabla anterior.

La tarifa eléctrica correspondiente a la fila 9 de la Tabla 3, da muestra de un pliego tarifario dado por ENEL, quien posee la concesión de distribución en la zona del proyecto (Comuna de Las Condes), en la cual nos acogimos a la **Tarifa BT-4.3** obteniendo un cargo por demanda máxima de potencia suministrada en función de nuestro consumo, y otro por demanda máxima de potencia en horario punta, ya que en los meses entre abril y septiembre habrá un recargo por contar con consumo eléctrico en horario punta, generando

beneficios económicos versus las otras tarifas presentadas **BT-4.2** por ejemplo, puesto que esta última mide la demanda máxima en horario punta y contratando una demanda máxima, siendo más conveniente en nuestro caso la tarifa BT4.3 por tener una carga variable.

Ahorro proyectado

La diferencia de estos dos últimos ítems significa un ahorro anual de **725,81 UF**.

Inversiones

Las inversiones proyectadas alcanzan un valor de **1.599,20 U.F.**, valor proveniente de:

Capital de Trabajo	310,00 UF
Activos Fijos	1289,19 UF

Activos Fijos	
Cantidad	Equipo / Valor
3	Bombas de Calor / 344,45 UF
2	Acumuladores / 127,92 UF

Tabla 1. Detalle de Activos Fijos Presentados.

La Tabla 3 muestra un resumen de los recursos que se requieren para desarrollar el proyecto:

Ítem	Valor	Unidad
Periodo de la depreciación	36	[meses]
Impuesto a la utilidad	25%	[%]
Capital de trabajo	\$10.790.010	[CLP]
Capital de trabajo	310,00	[UF]
Inversión de equipos	1.289,19	[UF]
Horizonte de evaluación	6	[AÑOS]
Tasa de descuento anual	12%	[%]
Descuento Distribuidora de gas	0%	[%]
Tarifa eléctrica	\$112	[CLP]
Valor bombas de calor	344,45	[UF]
Valores acumuladores	127,92	[UF]

Cantidad bombas de calor	3	[UNIDADES]
Cantidad acumuladores	2	[UNIDADES]
Horas de utilización en invierno BBC	2,2	HR
Tipo de cambio	34806,01	UF / CLP
	29-11-2022	

Tabla 2. Tabla Resumen de los datos de la inversión.

Las especificaciones técnicas de estos equipos y sus cotizaciones pueden ser consultadas en el Anexo N°1.

Flujo de caja

El flujo de caja hace referencia a la acumulación neta de activos líquidos (salidas y entradas netas de dinero), que tiene una empresa o proyecto en el período de evaluación escogido de 6 años, constituyendo un indicador importante de su liquidez. La diferencia de los ingresos y los gastos, es decir, al resultado de restar a los ingresos que tiene la empresa, los gastos a los que tiene que hacer, se le llama “flujo de caja neto”.

En la Tabla 5 se presenta el flujo de caja del proyecto aquí analizado; nótese que el horizonte del proyecto es de 6 años, pero el cuadro de datos incluye la proyección hasta el año 10, sólo a fin de apreciar el comportamiento de los flujos posteriores. La Tabla 4 resume los principales indicadores que se desprenden del flujo de caja y que también se pueden apreciar en la Tabla 5.

VAN	1053,98 UF
TIR	38%
PRI	3 AÑOS

Tabla 3. Resumen Indicadores Económicos.

PARTIDA	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
ENERGÍA CONSUMIDA											
GASTO OPERACIONAL COMBUSTIBLE CALDERA		UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57	UF 1.342,57
GASTO MANTENCIÓN CALDERA		UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67	UF 120,67
GASTO TOTAL CALDERA		UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23	UF 1.463,23
GASTO OPERACIONAL COMBUSTIBLE BOMBA DE CALOR		UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00	UF 687,00
GASTO MANTENCIÓN BOMBA DE CALOR		UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42	UF 50,42
GASTO TOTAL BOMBA DE CALOR		UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42	UF 737,42
INGRESO POR AHORRO		UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81
INGRESOS TOTALES		UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81
OTROS COSTOS		UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -
EBITDA		UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81
DEPRECIACIÓN EQUIPOS		UF 429,73	UF 429,73	UF 429,73	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -
INTERESES		UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -
UTILIDAD BRUTA		UF 296,08	UF 296,08	UF 296,08	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81	UF 725,81
IMPUESTO A LA UTILIDAD 25%		UF 74,02	UF 74,02	UF 74,02	UF 181,45	UF 181,45	UF 181,45	UF 181,45	UF 181,45	UF 181,45	UF 181,45
UTILIDAD NETA		UF 222,06	UF 222,06	UF 222,06	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36
DEPRECIACIÓN EQUIPOS		UF 429,73	UF 429,73	UF 429,73	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -
FLUJO DE CAJA OPERACIONAL		UF 651,79	UF 651,79	UF 651,79	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36
AMORTIZACION		UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -
CAPITAL DE TRABAJO	UF 310,00	UF -	UF -	UF -	UF -	UF -	UF 310,00	UF -	UF -	UF -	UF -
INVERSIÓN EQUIPOS	UF 1.289,19										
FLUJO DE CAJA DE CAPITAL	UF 1.599,20										
FLUJO NETO DE CAJA	UF -1.599,20	UF 651,79	UF 651,79	UF 651,79	UF 544,36	UF 544,36	UF 854,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36	UF 544,36
FLUJO DE CAJA	UF -1.599,20	UF -947,41	UF -295,61	UF 356,18	UF 900,54	UF 1.444,90	UF 2.299,26	UF 2.843,62	UF 3.387,98	UF 3.932,34	UF 4.476,70
VAN	UF 1.053,98										
TIR	38%										
PRI	3										

Tabla 4. Flujo de Caja del Proyecto.

En los subcapítulos siguientes, se comenta la información que compone o que se desprende de este flujo

Tasa de descuento

Las tasas de descuento se asocian al origen de los recursos financieros, y al nivel de riesgo asignado por quien invierte. Se distinguen 3 principales orígenes para los recursos de un proyecto, e igual número de consideraciones: inversión externa, inversión propia con endeudamiento bancario, e inversión propia con fondos privados, siendo esta última la opción escogida para este proyecto. A continuación, una explicación para cada alternativa:

a) Inversión proveniente de un agente externo.

La tasa puede ser bastante variable entre un inversionista y otro, en función de conceptos como el costo de oportunidad, nivel de especialización, etcétera. A fin de objetivizar este cálculo existen métodos cuantitativos transversalmente aceptados, siendo uno de los más utilizados el método CAPM (siglas de Capital Asset Pricing Model), que calcula la tasa de descuento (R) relacionándola con el rendimiento general del mercado (R_m), con el rendimiento que tendría el capital sin ser sometido a riesgo (R_f), y con un factor β (que representa el riesgo del rubro del proyecto respecto al riesgo del mercado general); la relación se expresa en la siguiente fórmula:

$$R = R_f + (R_m - R_f) * \beta$$

b) Financiamiento proveniente de agentes bancarios

En Chile las tasas de interés aparecen publicadas en el sitio web de cada entidad bancaria; como ejemplo, BancoEstado, para empresas pequeñas (menos de 5.000 UF por operación), públicas tasas nominales mensuales de 0,96% en créditos de corto plazo, y de 0,99% en créditos de largo plazo; la Tabla 6 muestra los detalles:

Créditos para Pequeña Empresa

Tasas de Interés Nominales (%)		
	Menor o igual a 12 meses	Mayor a 12 meses hasta 240 meses
Rango de Montos por Operación	Tasa Mensual	Tasa Mensual
Menor o igual UF 5.000	0,96%	0,99%
Mayor UF 5.000	0,52%	0,54%

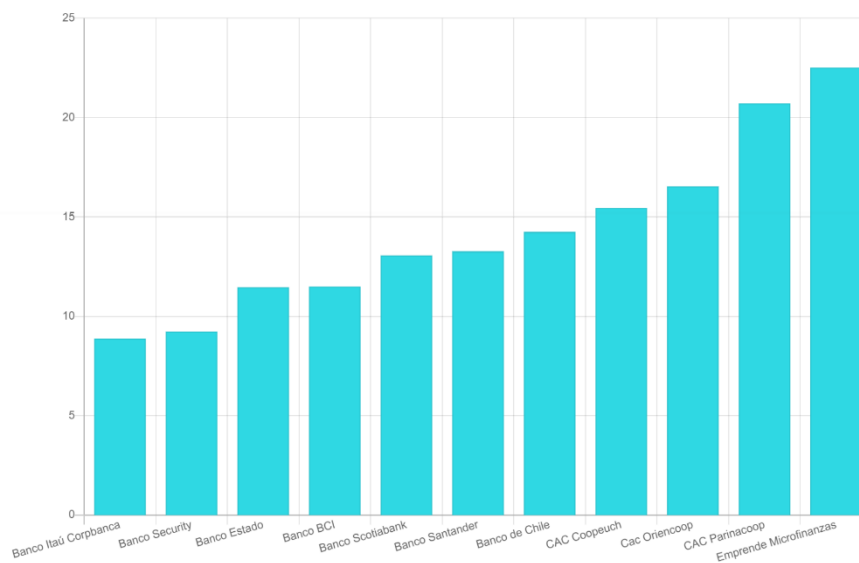
Tabla 5. Tasas de Interés Nominales. Fuente. Portal Banco Estado.



MICROEMPRESA

FOGAIN - Segmento microempresas

tasas de interés en pesos flujo período 01/01/2020 - 31/12/2020



Para la elección de la entidad bancaria, existen ayudas como la que ofrece el portal de CORFO, que compara las tasas de interés de la banca nacional; la ilustración 6 ofrece los detalles:

Ilustración 2. Comparación de Tasa entre Entidades Bancarias. Fuente. Portal CORFO.

c) Financiamiento proveniente de los propios dueños del proyecto:

En tal caso, al igual que ocurre con inversionistas externos, se cumple que la tasa de descuento es prerrogativa del dueño del capital, y responde a parámetros como el costo de oportunidad, nivel de especialización, necesidades particulares, nivel de expectativas de desarrollo, etcétera.

La presente evaluación se realiza precisamente en estas condiciones, como “Proyecto Puro”, sin participación de inversionistas externos, y además sin endeudamiento bancario; esto se plantea bajo el precepto de que *“Si la rentabilidad de un proyecto no es positiva para sus propios dueños, difícilmente resultará atractivo para un inversionista arriesgar en él su capital”*.

La tasa de interés asignada es de un 12%, y está basada en la actual tasa libre de riesgo obtenida a partir de la emisión de bonos del banco central de Chile y a la tasa de mercado obtenida a partir de la rentabilidad del IPSA para el último periodo anual.

Depreciaciones

La legislación chilena regula el tiempo de vida útil considerado para los activos de un proyecto; particularmente, el Servicio de Impuestos Internos (SII) es el ente encargado en el país, y publica en su portal oficial la tabla “Vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado”. En dicha tabla se establecen los períodos en que es posible descontar de impuestos el avalúo de los activos; la columna “depreciación acelerada” acota dichos períodos a fin de que la mayor parte de estos avalúos puedan ser descontados dentro del horizonte del proyecto.

Los activos del presente proyecto aparecen categorizados en la sección A “Activos Genéricos”, clasificación 17 “Equipos de aire y cámaras de refrigeración”, asignando como depreciación acelerada un período de 3 años.

La ilustración 7 muestra la tabla mencionada.

NÓMINA DE BIENES SEGUN ACTIVIDADES	NUEVA VIDA ÚTIL NORMAL	DEPRECIACIÓN ACELERADA
A.- ACTIVOS GENÉRICOS		
17) Equipos de aire y cámaras de refrigeración.	10	3

Ilustración 3. Extracto Tabla de Depreciación S.I.I. Fuente. Portal SII

En esta condición, siendo el monto de inversión en equipos de 1.289,19 UF, la depreciación acelerada alcanza un monto de 429,73 UF anuales, durante los 3 primeros años.

VAN

El VAN corresponde a **Valor Actual Neto**, y muestra la diferencia de la rentabilidad final de un proyecto respecto a lo esperado por el inversionista, con valores actualizados a valor presente de acuerdo con la depreciación del dinero en los períodos del proyecto, y afectado por la tasa de descuento involucradas. Así, un VAN calculado en 0, indica que, tras actualizar a valor presente, el proyecto obtiene exactamente la rentabilidad esperada.

El hecho de expresar los valores en Unidades de Fomento facilita el análisis por tratarse de una moneda exenta de depreciación.

Para el presente proyecto, en las condiciones analizadas, el valor del VAN es 1.053,98 U.F.

TIR

La TIR corresponde a la **Tasa Interna de Retorno**, y muestra el límite al que puede llegar la Tasa de Descuento sin afectar la rentabilidad del proyecto. Dicho de otra forma, cuando la Tasa de Descuento alcanza el valor de la TIR, y el VAN alcanza valor 0, el inversionista logra exactamente la rentabilidad esperada; cualquier alza adicional de la Tasa llevará el VAN a valores negativos. Para el presente proyecto, en las condiciones analizadas, la TIR se ha calculado en un 38%.

PRI

El PRI corresponde al **Período de Retorno de la Inversión**, que, para este proyecto, en las condiciones citadas es de 3 años.

Sensibilizaciones

Se presentan 5 tablas con sensibilizaciones simultáneas (Ilustraciones 8 a la 13).

SENSIBILIZACIÓN 1			TASA DE DESCUENTO ESCOGIDA														
VAN	UF	1.053,98	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%							
DESCUENTO DE PROVEEDOR DE GAS NATURAL	0%	UF	1.389,53	UF	1.213,79	UF	1.053,98	UF	908,29	UF	775,15	UF	653,18	UF	541,20	UF	438,17
	5%	UF	1.156,79	UF	994,52	UF	846,99	UF	712,51	UF	589,63	UF	477,09	UF	373,77	UF	278,72
	10%	UF	924,04	UF	775,25	UF	639,99	UF	516,73	UF	404,12	UF	301,00	UF	206,35	UF	119,28
	15%	UF	691,30	UF	555,98	UF	433,00	UF	320,95	UF	218,61	UF	124,91	UF	38,92	UF	-40,16
	20%	UF	458,55	UF	336,71	UF	226,01	UF	125,17	UF	33,10	UF	-51,18	UF	-128,51	UF	-199,60
	25%	UF	225,81	UF	117,44	UF	19,01	UF	-70,61	UF	-152,42	UF	-227,28	UF	-295,93	UF	-359,05
	30%	UF	-6,93	UF	-101,84	UF	-187,98	UF	-266,39	UF	-337,93	UF	-403,37	UF	-463,36	UF	-518,49
	35%	UF	-239,68	UF	-321,11	UF	-394,98	UF	-462,17	UF	-523,44	UF	-579,46	UF	-630,79	UF	-677,93
	40%	UF	-472,42	UF	-540,38	UF	-601,97	UF	-657,95	UF	-708,95	UF	-755,55	UF	-798,21	UF	-837,37
	45%	UF	-705,17	UF	-759,65	UF	-808,96	UF	-853,73	UF	-894,47	UF	-931,64	UF	-965,64	UF	-996,81
50%	UF	-937,91	UF	-978,92	UF	-1.015,96	UF	-1.049,51	UF	-1.079,98	UF	-1.107,73	UF	-1.133,07	UF	-1.156,26	

Ilustración 4. Sensibilización 1.

De la sensibilización 1 se desprende que, para la tasa de descuento seleccionada (12%), la evaluación realizada soporta hasta un 25% de disminución en el precio de su principal energía competidora: el gas natural. Un descuento mayor por parte del proveedor de gas (30%) llevaría a la no viabilidad del proyecto, incluso reduciendo la expectativa de utilidades a una tasa de 8%.

SENSIBILIZACIÓN 2			TASA DE DESCUENTO ESCOGIDA														
VAN	UF	1.053,98	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%							
AJUSTE O DESCUENTO EN VALOR DE LOS EQUIPOS	-20%	UF	1.187,07	UF	1.009,39	UF	847,75	UF	700,34	UF	565,56	UF	442,06	UF	328,62	UF	224,21
	-15%	UF	1.237,68	UF	1.060,49	UF	899,31	UF	752,32	UF	617,96	UF	494,84	UF	381,77	UF	277,70
	-10%	UF	1.288,30	UF	1.111,59	UF	950,86	UF	804,31	UF	670,35	UF	547,62	UF	434,91	UF	331,19
	-5%	UF	1.338,92	UF	1.162,69	UF	1.002,42	UF	856,30	UF	722,75	UF	600,40	UF	488,06	UF	384,68
	0%	UF	1.389,53	UF	1.213,79	UF	1.053,98	UF	908,29	UF	775,15	UF	653,18	UF	541,20	UF	438,17
	5%	UF	1.440,15	UF	1.264,89	UF	1.105,54	UF	960,28	UF	827,54	UF	705,96	UF	594,35	UF	491,66
	10%	UF	1.490,77	UF	1.315,99	UF	1.157,10	UF	1.012,27	UF	879,94	UF	758,74	UF	647,49	UF	545,15
	15%	UF	1.541,38	UF	1.367,09	UF	1.208,65	UF	1.064,26	UF	932,33	UF	811,52	UF	700,63	UF	598,63
	20%	UF	1.592,00	UF	1.418,20	UF	1.260,21	UF	1.116,24	UF	984,73	UF	864,30	UF	753,78	UF	652,12

Ilustración 5. Sensibilización 2.

De la sensibilización 2 se desprende que la evaluación realizada no se vería mayormente afectado por variaciones en el precio de los equipos, en el rango de 20% de aumento (o “-20% de descuento”), hasta 30% de disminución (o “30% de descuento”). Si bien las rentabilidades varían (como es de esperar), no llegan a poner en peligro el carácter “positivo” del VAN, incluso aumentando la tasa de descuento hasta un 22%.

SENSIBILIZACIÓN 3			PRECIO DE LA TARIFA ELÉCTRICA															
VAN	UF	1.053,98	\$	92	\$	102	\$	112	\$	122	\$	132	\$	142	\$	152	\$	162
DESCUENTO DE PROVEEDOR DE GAS NATURAL	0%	UF	1.432,27	UF	1.243,12	UF	1.053,98	UF	864,84	UF	675,70	UF	486,55	UF	297,41	UF	108,27	
	10%	UF	1.018,28	UF	829,14	UF	639,99	UF	450,85	UF	261,71	UF	72,56	UF	-116,58	UF	-305,72	
	20%	UF	604,29	UF	415,15	UF	226,01	UF	36,86	UF	-152,28	UF	-341,42	UF	-530,57	UF	-719,71	
	30%	UF	190,30	UF	1,16	UF	-187,98	UF	-377,13	UF	-566,27	UF	-755,41	UF	-944,55	UF	-1.133,70	
	40%	UF	-223,68	UF	-412,83	UF	-601,97	UF	-791,11	UF	-980,26	UF	-1.169,40	UF	-1.358,54	UF	-1.547,68	
	50%	UF	-637,67	UF	-826,81	UF	-1.015,96	UF	-1.205,10	UF	-1.394,24	UF	-1.583,39	UF	-1.772,53	UF	-1.961,67	
	60%	UF	-1.051,66	UF	-1.240,80	UF	-1.429,95	UF	-1.619,09	UF	-1.808,23	UF	-1.997,37	UF	-2.186,52	UF	-2.375,66	
	70%	UF	-1.465,65	UF	-1.654,79	UF	-1.843,93	UF	-2.033,08	UF	-2.222,22	UF	-2.411,36	UF	-2.600,50	UF	-2.789,65	
	80%	UF	-1.879,63	UF	-2.068,78	UF	-2.257,92	UF	-2.447,06	UF	-2.636,21	UF	-2.825,35	UF	-3.014,49	UF	-3.203,63	
	90%	UF	-2.293,62	UF	-2.482,77	UF	-2.671,91	UF	-2.861,05	UF	-3.050,19	UF	-3.239,34	UF	-3.428,48	UF	-3.617,62	
	100%	UF	-2.707,61	UF	-2.896,75	UF	-3.085,90	UF	-3.275,04	UF	-3.464,18	UF	-3.653,32	UF	-3.842,47	UF	-4.031,61	

Ilustración 6. Sensibilización 3.

De la sensibilización 3 se desprende que, para el precio de energía considerado en la evaluación realizada (\$112 / KW), la presente evaluación soporta hasta un 20% de disminución en el precio de su principal energía competidora: el gas natural (tal vez 25% interpolando la gráfica); al igual que en la sensibilización 1, se observa que un descuento mayor por parte del proveedor de gas (30%) llevaría a la no viabilidad de la evaluación. El escenario muestra, además, que si el precio de la tarifa eléctrica alcanzara los \$152 /KW (casi 36% de aumento), recién en ese caso, esta flexibilidad se perdería, y la evaluación realizada no soportaría descuentos en el precio del gas natural.

SENSIBILIZACIÓN 4			TASA DE DESCUENTO ESCOGIDA														
VAN	UF	1.053,98	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%							
HORAS DE UTILIZACIÓN DE BBC EN INVIERNO	2,20	UF	1.389,53	UF	1.213,79	UF	1.053,98	UF	908,29	UF	775,15	UF	653,18	UF	541,20	UF	438,17
	2,75	UF	1.050,81	UF	894,68	UF	752,74	UF	623,36	UF	505,16	UF	396,91	UF	297,54	UF	206,12
	3,00	UF	896,85	UF	749,63	UF	615,81	UF	493,85	UF	382,44	UF	280,42	UF	186,78	UF	100,65
	3,25	UF	742,88	UF	604,58	UF	478,88	UF	364,34	UF	259,72	UF	163,93	UF	76,03	UF	-4,82
	3,50	UF	588,92	UF	459,52	UF	341,95	UF	234,83	UF	137,00	UF	47,45	UF	-34,73	UF	-110,30
	3,75	UF	434,95	UF	314,47	UF	205,02	UF	105,32	UF	14,28	UF	-69,04	UF	-145,48	UF	-215,77
	4,00	UF	280,99	UF	169,42	UF	68,09	UF	-24,19	UF	-108,43	UF	-185,53	UF	-256,24	UF	-321,24
	4,25	UF	127,03	UF	24,37	UF	-68,84	UF	-153,70	UF	-231,15	UF	-302,01	UF	-366,99	UF	-426,72
	4,50	UF	-26,94	UF	-120,68	UF	-205,77	UF	-283,21	UF	-353,87	UF	-418,50	UF	-477,75	UF	-532,19
	4,75	UF	-180,90	UF	-265,73	UF	-342,70	UF	-412,73	UF	-476,59	UF	-534,99	UF	-588,50	UF	-637,66
	5,00	UF	-334,87	UF	-410,78	UF	-479,63	UF	-542,24	UF	-599,31	UF	-651,47	UF	-699,26	UF	-743,14
	6,00	UF	-950,72	UF	-990,99	UF	-1.027,35	UF	-1.060,28	UF	-1.090,19	UF	-1.117,42	UF	-1.142,28	UF	-1.165,03
	7,00	UF	-1.566,58	UF	-1.571,19	UF	-1.575,07	UF	-1.578,33	UF	-1.581,07	UF	-1.583,37	UF	-1.585,30	UF	-1.586,93
	8,00	UF	-2.182,44	UF	-2.151,40	UF	-2.122,79	UF	-2.096,37	UF	-2.071,95	UF	-2.049,32	UF	-2.028,33	UF	-2.008,82
	9,00	UF	-2.798,29	UF	-2.731,60	UF	-2.670,51	UF	-2.614,42	UF	-2.562,82	UF	-2.515,27	UF	-2.471,35	UF	-2.430,72
	10,00	UF	-3.414,15	UF	-3.311,81	UF	-3.218,23	UF	-3.132,47	UF	-3.053,70	UF	-2.981,22	UF	-2.914,37	UF	-2.852,61

Ilustración 7. Sensibilización 4.

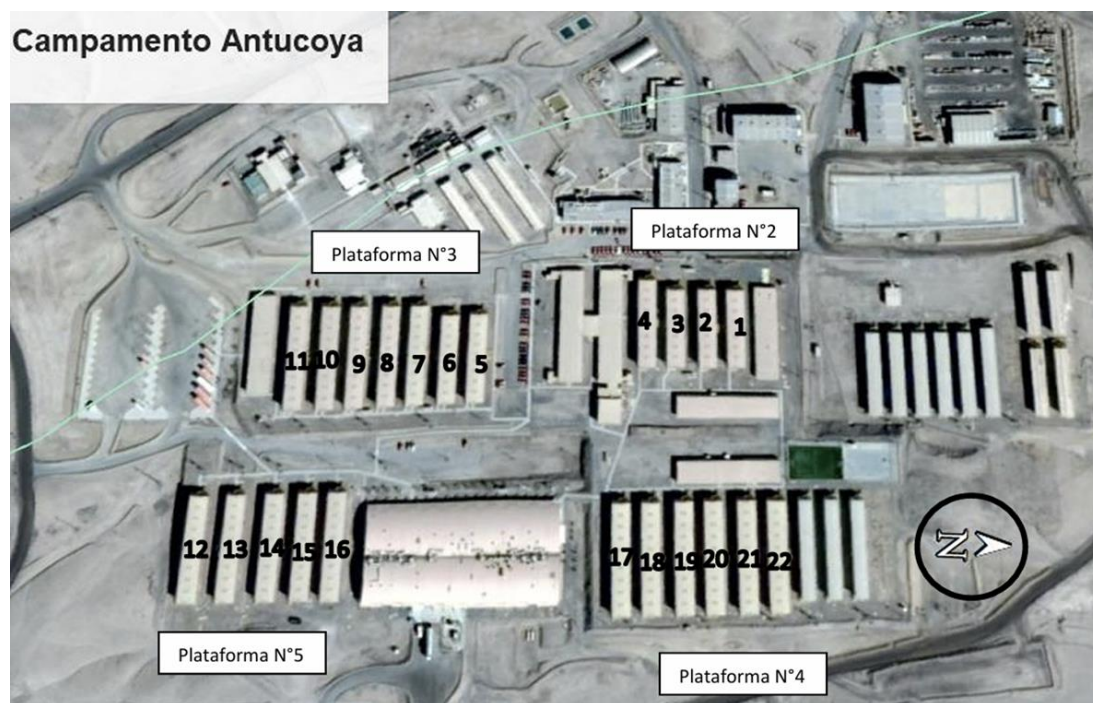
De la sensibilización 4 se desprende que, para la tasa de descuento seleccionada (12%), la evaluación realizada soportaría que las bombas operaran hasta por 4 horas diarias de forma continua. Este aumento estaría asociado a una disminución de la capacidad térmica de las bombas, causado por bajas temperaturas en un eventual invierno muy frío.

SENSIBILIZACIÓN 5			TASA DE DESCUENTO ESCOGIDA														
VAN	UF	1.053,98	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%							
PORCENTAJE DE AHORRO DESTINADO A LA COMUNIDAD EN EL FLUJO	0%	UF	1.389,53	UF	1.213,79	UF	1.053,98	UF	908,29	UF	775,15	UF	653,18	UF	541,20	UF	438,17
	10%	UF	1.137,88	UF	976,71	UF	830,17	UF	696,61	UF	574,56	UF	462,78	UF	360,17	UF	265,77
	20%	UF	886,23	UF	739,62	UF	606,36	UF	484,92	UF	373,98	UF	272,39	UF	179,15	UF	93,38
	30%	UF	634,58	UF	502,54	UF	382,56	UF	273,24	UF	173,40	UF	81,99	UF	-1,88	UF	-79,02
	40%	UF	382,93	UF	265,46	UF	158,75	UF	61,56	UF	-27,18	UF	-108,40	UF	-182,91	UF	-251,41
	50%	UF	131,28	UF	28,38	UF	-65,06	UF	-150,13	UF	-227,77	UF	-298,80	UF	-363,94	UF	-423,81
	60%	UF	-120,37	UF	-208,71	UF	-288,87	UF	-361,81	UF	-428,35	UF	-489,19	UF	-544,96	UF	-596,20
	70%	UF	-372,02	UF	-445,79	UF	-512,68	UF	-573,49	UF	-628,93	UF	-679,59	UF	-725,99	UF	-768,59
	80%	UF	-623,68	UF	-682,87	UF	-736,49	UF	-785,18	UF	-829,51	UF	-869,98	UF	-907,02	UF	-940,99
	90%	UF	-875,33	UF	-919,96	UF	-960,30	UF	-996,86	UF	-1.030,09	UF	-1.060,38	UF	-1.088,05	UF	-1.113,38
100%	UF	-1.126,98	UF	-1.157,04	UF	-1.184,10	UF	-1.208,54	UF	-1.230,68	UF	-1.250,77	UF	-1.269,07	UF	-1.285,78	

Ilustración 8. Sensibilización 5.

De la sensibilización 5 se desprende que, para la tasa de descuento seleccionada (12%), la evaluación realizada soportaría la compartición de hasta un 40% de los ahorros en energía. El PRI se vería afectado en tal caso, pero, siempre y cuando se mantenga en el horizonte de la evaluación, como a su vez espacio de negociación a la hora de negociar un posible contrato con proveedores.

9. CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO APLICACIÓN INDUSTRIAL



El presente caso de estudio forma parte del programa “4e Chile”, iniciativa impulsada por GIZ y el Ministerio de Energía de Chile, con foco en implementar medidas de eficiencia energética en el sector minero, altamente intensivo en consumo térmico y eléctrico. Minera Antucoya —operada por Antofagasta Minerals— se ubica en la región de Antofagasta y cuenta con campamentos con 22 pabellones habitacionales, cada uno dotado de acumuladores eléctricos individuales para calentar agua sanitaria (duchas y lavamanos).

El objetivo del estudio fue identificar alternativas más eficientes y sostenibles al sistema actual de calefacción eléctrica, que presenta altos costos operativos, elevada huella de carbono y baja eficiencia energética.

Diagnóstico técnico del sistema actual

Sistema base:

Tipo: Acumuladores eléctricos.

Consumo energético anual: 1.521.898 kWh/año.

Costo operacional (OPEX): USD 241.065/año.

Emisiones GEI: 637,2 toneladas de CO₂/año.

Eficiencia térmica: Muy baja (< 100 %).

Evaluación técnico-económica de tecnologías alternativas

Se compararon cuatro soluciones tecnológicas:

Tecnología	CAPEX (USD)	OPEX (USD/año)	Energía (kWh/año)	Emisiones GEI (tCO ₂ /año)	VAN (USD)	TIR (%)	Payback
Calefón de condensación (GN)	133.733	193.132	1.370.697	311,7	230.950.257	820 %	0,12 años
Caldera de condensación (GN)	264.866	203.796	1.443.051	328,2	73.623.290	24,1 %	3,7 años
Bomba de calor eléctrica (BdC)	338.611	125.155	492.080	206	401.198.644	54,3 %	1,82 años
Base (acumuladores eléctricos)	127.889	241.065	1.521.898	637,2	– (referencia)	–	–

Resultados clave:

La bomba de calor (BBC) es la tecnología más eficiente y con mejor retorno económico en el largo plazo, con una reducción del 68 % en consumo energético y 67 % en emisiones de CO₂.

Aunque requiere mayor inversión inicial (CAPEX), sus bajos costos operativos la hacen rentable desde el segundo año.

Diseño e ingeniería de implementación

Se propone instalar cuatro centrales térmicas descentralizadas, una por cada plataforma habitacional, para reducir pérdidas en el transporte de agua caliente y evitar grandes redes.

10. INDUSTRIAS NACIONALES EN BASE TÉRMICA PRODUCTIVA.

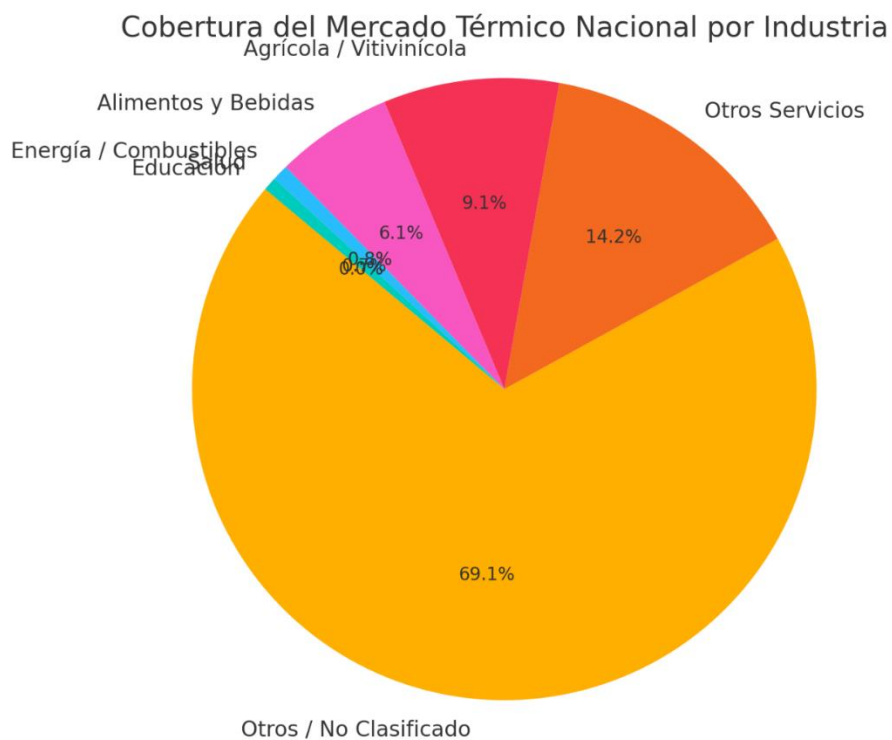


Ilustración 3. Gráfico de industrias nacionales en base térmica.

El gráfico de cobertura del mercado térmico nacional, basado en la potencia térmica instalada (kW), permite visualizar la distribución sectorial del consumo térmico en Chile. Esta herramienta es clave para entender el perfil de demanda energética y orientar políticas de descarbonización y eficiencia en sectores específicos

El análisis de la distribución geográfica de la potencia térmica instalada en Chile revela una fuerte concentración en ciertas regiones, destacando la importancia industrial y de servicios en estos territorios. El estudio considera un total de **7.857 instalaciones** térmicas registradas a nivel nacional, clasificadas por industria y por región.

Región Metropolitana

- Lidera ampliamente en potencia térmica instalada.
- Alta densidad de industrias, centros de distribución, hospitales y plantas de alimentos.
- Fuerte demanda de sistemas térmicos centralizados.

Regiones de Valparaíso, Maule y Libertador Bernardo O'Higgins

- Alta actividad agroindustrial y vitivinícola.
- Necesidades térmicas ligadas a lavado, fermentación, secado y sanitización.
- Uso relevante de calderas de agua caliente y vapor.

Regiones del Biobío y Los Lagos

- Tradicionales centros de industrias madereras, celulosa y alimentaria.
- Potencia instalada significativa en plantas de procesamiento.

Regiones del norte (Antofagasta, Atacama)

- Si bien son zonas mineras claves, presentan menor presencia en esta base de datos.
- Podría reflejar el uso de otras fuentes energéticas o falta de registros térmicos completos.

Regiones extremas (Aysén, Magallanes)

- Baja concentración térmica registrada.

- Uso intensivo en servicios sanitarios y calefacción, aunque de menor escala industrial.

10.1.1 Predominio del sector “Otros / No Clasificado” (69,1%)

El 69,1% del total corresponde a empresas cuya actividad principal no fue identificada con precisión en la base de datos disponible. Esta categoría agrupa un universo diverso que incluye grandes actores como:

- **Rendic Hermanos S.A.:** sector retail y supermercados.
- **Nestlé Chile S.A.:** industria alimentaria multinacional.
- **Sopralval S.A.:** agroindustria avícola y porcina.
- **Codelco – División El Teniente:** minería del cobre.

Este hallazgo revela un vacío clasificatorio que limita la trazabilidad del uso térmico por sector y sugiere la necesidad de mejorar la taxonomía de registros administrativos, con el fin de facilitar el diseño de instrumentos específicos de eficiencia térmica y electrificación industrial.

10.2 Sectores identificados con uso intensivo de calor

Entre las industrias con mayor participación identificada, destacan:

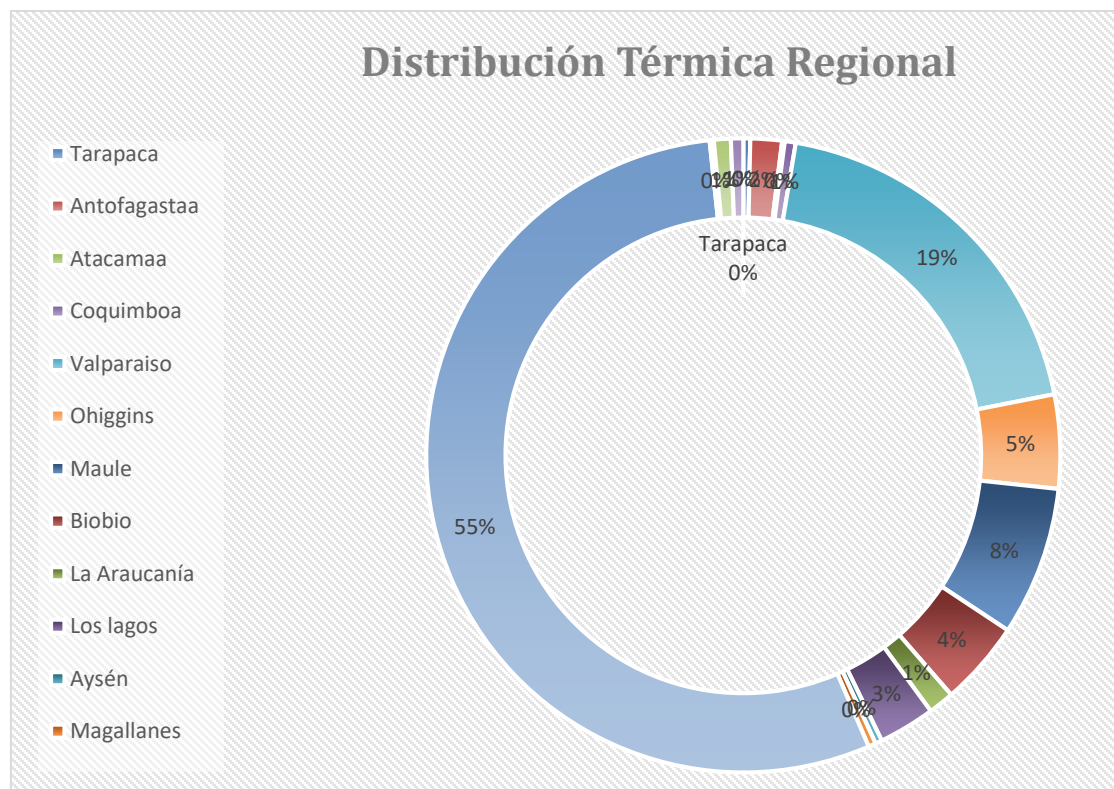
- **Alimentos y Bebidas:** Requieren calor para procesos como cocción, secado, pasteurización y limpieza industrial. Empresas como Carozzi, Soprole o Watt's se encuentran representadas. Esta industria suele trabajar con calderas de vapor y agua caliente de gran capacidad.
- **Agrícola / Vitivinícola:** Utilizan sistemas térmicos para la fermentación controlada, lavado, sanitización y secado de productos. La actividad está distribuida principalmente en la zona central del país (regiones VI, VII y Metropolitana).
- **Energía / Combustibles:** Corresponde a empresas distribuidoras como Abastible, Gasco y ENAP. Su presencia en la base refleja instalaciones térmicas propias para procesos o pruebas, aunque su volumen es más acotado.
- **Salud:** Comprende hospitales y clínicas que emplean sistemas térmicos en lavandería, esterilización, climatización y producción de agua caliente sanitaria.
- **Educación:** Menor participación, pero con presencia en instalaciones térmicas de instituciones como universidades y colegios, principalmente en zonas de clima frío.

10.3 Relevancia estratégica del análisis térmico

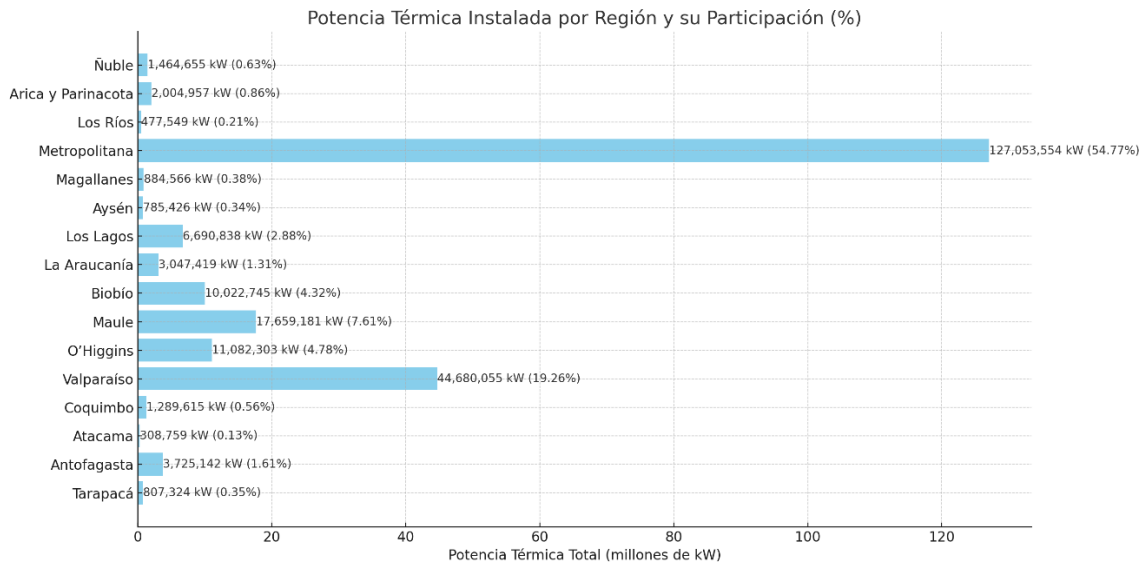
La caracterización sectorial del uso térmico es una herramienta fundamental para:

- **Diseñar políticas públicas diferenciadas:** el Ministerio de Energía y la Agencia de Sostenibilidad Energética (ASE) pueden dirigir programas de electrificación térmica con foco sectorial.
- **Identificar oportunidades de eficiencia energética:** sectores con alta intensidad térmica pueden beneficiarse de tecnologías como bombas de calor industriales, recuperación de calor residual o sistemas híbridos.
- **Impulsar la descarbonización industrial:** reemplazar combustibles fósiles en procesos térmicos es clave para cumplir los compromisos de carbono neutralidad al 2050 (Acuerdo de París, Ley Marco de Cambio Climático, 2022).

10.4 Potencias térmicas distribuidas regionalmente



El análisis de la distribución geográfica de la potencia térmica instalada en Chile revela una fuerte concentración en ciertas regiones, destacando la importancia industrial y de servicios en estos.



[Gráfico de barras horizontales que muestra la capacidad térmica instalada por región]

El estudio considera un total de **7.857 instalaciones** térmicas registradas a nivel nacional, clasificadas por industria y por región, de las que alcanzamos como país una potencia declarada por industrias del sector de **231.984.088 KW**.

Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta

- Zonas con baja representación térmica en la base de datos.
- Potencial subrepresentado debido a uso de energía en minería no térmica o falta de registros.

Atacama y Coquimbo

- Mayor participación de instalaciones asociadas a servicios e industria vitivinícola.
- Demanda térmica relacionada con procesos de limpieza, agua caliente sanitaria y producción.

Valparaíso y Región Metropolitana

- Concentración significativa de instalaciones térmicas.
- Alta densidad de industrias manufactureras, hospitales y servicios.
- Alta potencia térmica instalada.

O'Higgins, Maule y Ñuble

- Zona agroindustrial intensiva.
- Requiere calor para procesos como pasteurización, secado, lavado y calefacción de espacios.

Biobío y La Araucanía

- Presencia histórica de industria de celulosa, madera y alimentos.
- Gran volumen de instalaciones térmicas en operación.

Los Ríos y Los Lagos

- Industrias acuícolas, lácteas y forestales predominan.
- Uso relevante de calderas de vapor y sistemas mixtos.

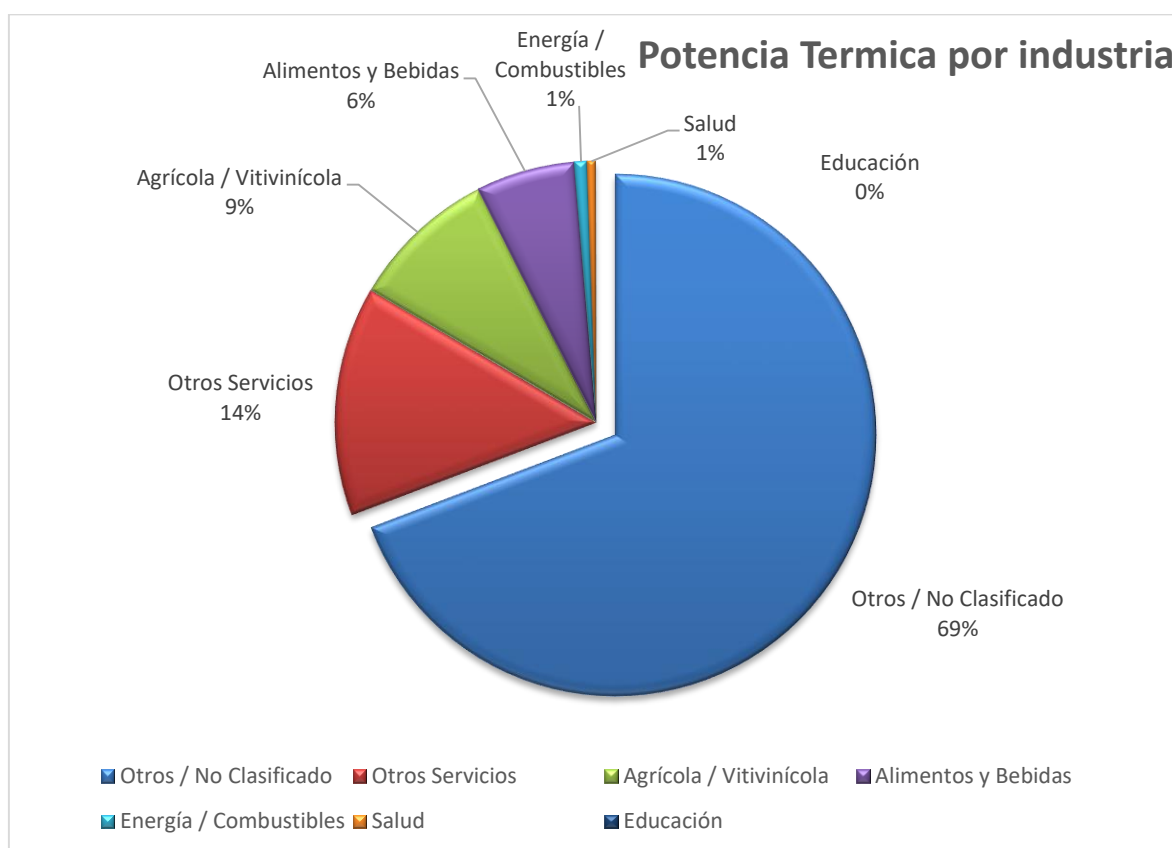
Aysén y Magallanes

- Baja participación relativa, pero con necesidades térmicas intensivas en infraestructura sanitaria y habitacional.
- Oportunidad para introducir tecnologías de calefacción eléctrica eficiente.

10.5 Reemplazo de productor térmico por tipos de industria

La descarbonización del sector industrial en Chile representa un eje estratégico para alcanzar los compromisos de carbono neutralidad establecidos en la Ley Marco de Cambio Climático (2022) y los NDC (Contribuciones Nacionalmente Determinadas) del país. Las industrias nacionales —especialmente las del sector agroalimentario, forestal, celulosa, acuícola, vitivinícola y manufacturero— concentran una parte significativa de la demanda térmica, históricamente abastecida por combustibles fósiles como GLP, diésel o gas natural.

Los datos analizados en esta investigación, provenientes de instalaciones térmicas en operación a lo largo del país, muestran que la mayoría de las industrias emplean calderas de agua caliente o vapor con fuentes fósiles, particularmente en las regiones de O'Higgins, Biobío, La Araucanía y Metropolitana. Estas industrias no solo presentan una alta densidad de consumo energético, sino también una oportunidad concreta para electrificar sus procesos térmicos mediante tecnologías como las bombas de calor de alta temperatura.



La electrificación térmica, combinada con una red eléctrica cada vez más limpia gracias al crecimiento de las energías renovables, permite reducir significativamente las emisiones de CO₂. De hecho, la sustitución de calderas a GLP por bombas de calor puede reducir hasta un 85% de las emisiones directas asociadas a la generación de calor. Además, esta transición energética ofrece ventajas

operacionales, como mayor eficiencia energética (COP 3.5–4.0), menores costos variables, y acceso a incentivos estatales y líneas de financiamiento verde.

Sin embargo, la descarbonización no está exenta de desafíos. Estos incluyen la necesidad de adecuar la infraestructura existente, superar las brechas técnicas en algunas regiones, y desarrollar modelos de negocio que aceleren la adopción tecnológica en pequeñas y medianas industrias.

11. CAPITULO 6: DESCARBONIZACIÓN DE LA MATRIZ ELÉCTRICA NACIONAL

Chile ha avanzado sostenidamente en un proceso de descarbonización de su matriz eléctrica, principalmente mediante el retiro progresivo de centrales a carbón, el fomento a las energías renovables y la integración tecnológica del sistema eléctrico.

Principales líneas de acción identificadas:

1. Retiro de Centrales a Carbón

- Desde 2019, se inició el cierre programado de centrales a carbón como parte del "Plan Nacional de Descarbonización", con una meta de cierre total al 2040. A 2023, varias unidades han cesado operación o están en proceso de reconversión.
- La política considera reemplazos por energías renovables no convencionales (ERNC) y almacenamiento energético.

2. Participación de ERNC en la Matriz

- En 2021, más del 27% de la generación eléctrica provino de fuentes solares, eólicas y geotérmicas. Se proyecta que esta participación supere el 60% al 2030, gracias a condiciones naturales favorables y un marco regulatorio activo.
- Las ERNC han permitido desplazar el uso del carbón, petróleo y diésel en la generación de base.

3. Modernización del Sistema Eléctrico Nacional (SEN)

- A través del Coordinador Eléctrico Nacional se han desarrollado estrategias de flexibilidad, sistemas de almacenamiento y gestión de

la demanda, fundamentales para integrar grandes cantidades de generación renovable variable.

- También se enfatiza la planificación de transmisión para evitar congestiones y pérdidas.

4. Agenda de Energía y PELP

- La Agenda de Energía 2022-2026 y el Plan Energético de Largo Plazo (PELP) refuerzan el compromiso de reducir las emisiones en la generación eléctrica, asegurando simultáneamente confiabilidad, seguridad y precios accesibles para los usuarios.

11.1 Emisiones CO_2 y sus factores

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) derivadas del uso de combustibles fósiles en procesos térmicos representan uno de los principales contribuyentes al cambio climático. Estas emisiones dependen directamente del tipo de combustible utilizado y de su eficiencia de conversión energética, lo que ha llevado al desarrollo de factores de emisión estándar, expresados comúnmente en kilogramos de CO_2 por kilovatio-hora útil (kgCO_2/kWh).

Fuente Energética	Factor de Emisión (kgCO ₂ /kWh)	Referencia Principal
GLP (gas licuado de petróleo)	0.227	IPCC 2006; MMA Chile
Gas natural	0.201	IPCC 2006; IEA
Petróleo diésel	0.267	IPCC 2006
Kerosene	0.245	IPCC 2006
Carbón (antracita)	0.340	IPCC 2006
Leña húmeda (ineficiente)	0.112	MMA Chile; estimación con 50% humedad
Pellets de madera	~0.017	IEA Bioenergy; emisiones indirectas de producción
Electricidad (promedio Chile 2023)	~0.095	MMA Chile; IEA (Tracking Clean Energy Progress)
Electricidad con bomba de calor	~0.027 0.032	Depende de COP (3.5–4.0)
Electricidad 100% renovable (solar/eólica)	≈ 0.000 0.010	IEA; LCA-based estimaciones

Estos factores son **promedios nacionales o internacionales**. Pueden variar por:

- Año y composición de la red eléctrica (en el caso de electricidad)
- Eficiencia del sistema térmico (por ejemplo, COP de bomba de calor)
- Ciclo de vida y emisiones indirectas (biomasa, pellets)

En **Chile**, la red eléctrica ha reducido significativamente su factor de emisión en la última década gracias a las energías renovables.

Fórmula general para comparar emisiones:

$$\text{CO}_2 \text{ evitado (kg)} = \text{Consumo GLP (kWh)} \times (\text{EF}_{\text{GLP}} - \text{EF}_{\text{Electricidad}})$$

- EF = Factor de emisión (en kgCO_2/kWh)
- Consumo GLP: energía que antes se usaba con GLP
- Electricidad: asumimos que la electricidad alimenta una bomba de calor (COP 3-4)

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) ha sido históricamente una fuente energética ampliamente utilizada en sectores industriales, comerciales y residenciales en Chile debido a su disponibilidad, facilidad de almacenamiento y alta densidad energética. Sin embargo, su uso implica una considerable emisión de gases de efecto invernadero, con un **factor de emisión cercano a 0.227 kgCO_2 por kWh térmico**, lo que contribuye significativamente al calentamiento global y a la huella de carbono del país.

Descarbonizar las matrices energéticas basadas en GLP, sustituyéndolas por **electricidad proveniente de fuentes renovables**, es una medida crucial para avanzar hacia los compromisos de carbono neutralidad al año 2050. Este proceso no solo implica la sustitución del combustible, sino también un cambio tecnológico mediante la adopción de sistemas más eficientes como las **bombas de calor**, que pueden alcanzar coeficientes de desempeño (COP) entre 3.5 y 4.5, multiplicando por tres o cuatro la eficiencia respecto a una caldera convencional a GLP.

La transición hacia electricidad renovable en la producción térmica permite:

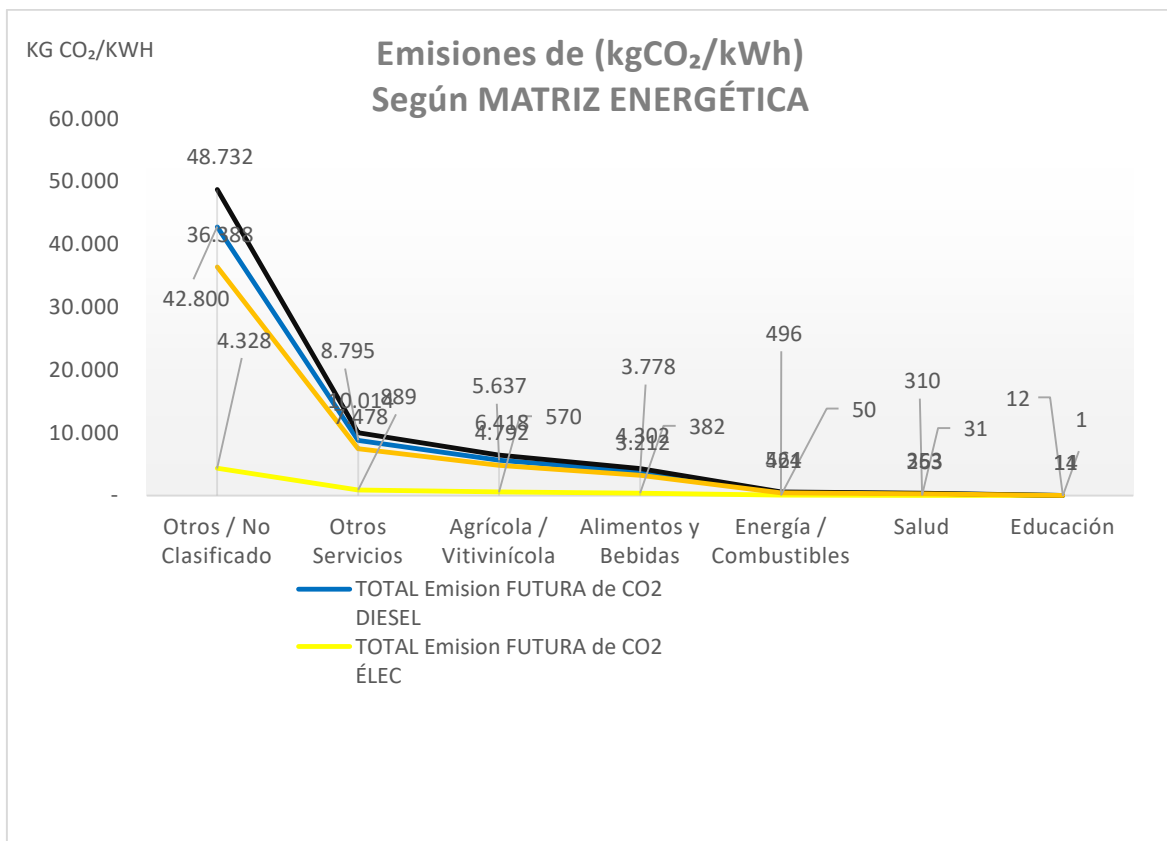
- Reducir en **más de un 80% las emisiones de CO_2** , dependiendo del mix eléctrico.
- Disminuir los **costos operacionales**, al reducir el consumo energético total.
- Disminuir la exposición a la volatilidad de los precios de combustibles fósiles.
- Acceder a incentivos financieros y regulatorios asociados a proyectos de eficiencia energética o descarbonización.

Adicionalmente, a medida que la matriz eléctrica chilena continúa incorporando energías renovables como solar y eólica, el **factor de emisión de la electricidad sigue disminuyendo** (actualmente estimado en $0.095 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ y bajando), reforzando el impacto positivo ambiental de la electrificación.

En síntesis, reemplazar el GLP por electricidad en matrices térmicas no solo es una estrategia eficaz para reducir emisiones, sino que también se alinea con una transformación estructural del modelo energético nacional hacia la sostenibilidad, eficiencia y resiliencia.

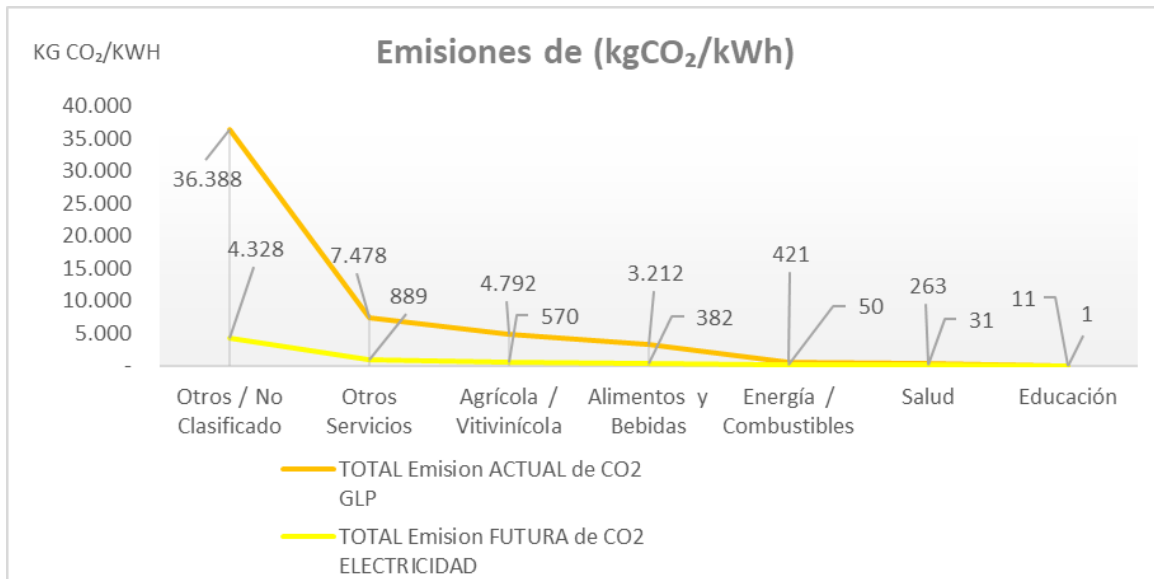
Consideraciones:

- Los valores reales pueden variar según el factor de emisión de la red eléctrica local, la eficiencia térmica de la caldera GLP, y el COP real de la bomba de calor.
- El factor de emisión eléctrico de Chile ha disminuido fuertemente debido al ingreso de ERNC.



El gráfico presentado muestra una comparación detallada de las emisiones de CO₂ (expresadas en kgCO₂/kWh) generadas por distintos tipos de matrices energéticas utilizadas en los sectores industriales del país. Se abordan tanto las emisiones actuales asociadas al uso de GLP (Gas Licuado de Petróleo), como las emisiones futuras proyectadas si se adoptaran tecnologías basadas en diésel, electricidad o carbón para los procesos térmicos.

Comportamiento del GLP: Emisión actual



La curva amarilla representa la emisión actual de CO₂ derivada del uso de GLP, mostrando un patrón decreciente entre sectores. El valor más alto se presenta en la categoría "Otros / No Clasificado" con aproximadamente 42.800 kgCO₂/kWh, seguido de "Otros Servicios" (8.795 kgCO₂/kWh) y "Agrícola / Vitivinícola" (5.637 kgCO₂/kWh). Esto evidencia una alta dependencia del GLP en sectores de servicios genéricos y agroindustria.

Hacia los sectores de menor demanda térmica, como "Educación" y "Salud", las emisiones se reducen significativamente, indicando un menor consumo específico de GLP.

Emisión futura: Diésel, Electricidad y Carbón

Las tres curvas de emisiones **futuras** consideran un eventual reemplazo del GLP por otras fuentes energéticas:

a) Diésel (línea azul):

- Muestra un comportamiento similar al GLP en cuanto a distribución, pero con valores **ligeramente menores** en la mayoría de los sectores.

- Por ejemplo, en “Otros / No Clasificado”, la emisión baja a **36.388 kgCO₂/kWh**, lo cual representa una reducción marginal pero no significativa en términos ambientales.
- Esta curva sugiere que **sustituir GLP por diésel no resulta una estrategia efectiva de descarbonización.**

b) Carbón (línea negra):

- A pesar de ser una fuente muy contaminante en general, en este modelo muestra emisiones comparables o incluso **ligeramente menores al GLP** en sectores medios como “Agrícola” o “Alimentos”.
- No obstante, la línea negra sigue siendo poco viable desde una perspectiva ambiental, dado su alto contenido de carbono y cuestionada sostenibilidad a largo plazo.

c) Electricidad (Amarilla):

- Esta curva representa la **propuesta más eficiente en términos de reducción de emisiones.**
- En todos los sectores, las emisiones son significativamente más bajas, cayendo a valores como:
 - **4.328 kgCO₂/kWh** en “Otros / No Clasificado”
 - **570 kgCO₂/kWh** en “Agrícola”
 - Apenas **1–14 kgCO₂/kWh** en sectores como “Educación” y “Salud”.
- Este comportamiento demuestra el **alto potencial de descarbonización** asociado a la electrificación de procesos térmicos, especialmente si se combina con bombas de calor y una matriz eléctrica cada vez más limpia en Chile.

12. CAPITULO 7: REGULACION, NORMATIVA Y PLANIFICACIÓN

12.1.1 Regulaciones europeas para la eliminación de calderas de gas y promoción de bombas de calor

La Unión Europea ha adoptado una postura ambiciosa en su transición energética, estableciendo un cronograma regulatorio para eliminar progresivamente las calderas de gas fósil e impulsar el reemplazo por tecnologías limpias, especialmente bombas de calor. Este enfoque se enmarca en el Plan RePowerEU (Comisión Europea, 2022), que busca reducir la dependencia energética del gas natural ruso, acelerar la electrificación del sector térmico y alcanzar la neutralidad climática para 2050.

Fechas y regulaciones clave:

- **2023:** La Comisión Europea comenzó a preparar el fin de los **incentivos a calderas de gas**. A partir de este año, se recomienda que los fondos públicos no apoyen la instalación de equipos térmicos alimentados exclusivamente por combustibles fósiles.
- **2025:** Se prohibirá la comercialización de **calderas a gas independientes** con baja eficiencia energética en varios Estados miembros, en el marco de la actualización de la **Directiva de Ecodiseño**.
- **2026:** Se exigirá que todos los **sistemas de calefacción nuevos** tengan una **parte de energía renovable integrada** (por ejemplo, bombas de calor o sistemas híbridos), según la **Directiva de Energías Renovables (RED II)**.
- **2029:** Se plantea la **prohibición completa de la venta de calderas de gas fósil** en la Unión Europea, salvo que estén integradas con tecnologías de bajo impacto ambiental (como colectores solares o bombas de calor híbridas). Este umbral marcará un punto de inflexión en el mercado térmico europeo.
- **2030:** Objetivo de **duplicar la tasa de instalación de bombas de calor**. Se espera alcanzar entre 10 y 15 millones de nuevas unidades instaladas en el sector residencial, comercial e industrial.

Incentivos y financiamiento

El plan RePowerEU contempla mecanismos de financiamiento a través del **Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR)**, que destina fondos europeos

para acelerar la transición térmica. Además, se fortalecen los programas de apoyo local para:

- La instalación de bombas de calor.
- La formación de técnicos e instaladores.
- La reconversión de redes de calefacción urbana para integrarlas con energías renovables.

Implicancias para Chile

Aunque estas regulaciones no aplican directamente en Chile, constituyen una referencia clave para el diseño de políticas nacionales. La experiencia europea demuestra que los **incentivos económicos, metas regulatorias claras y formación técnica** son fundamentales para acelerar la adopción de bombas de calor, una lección valiosa para el contexto chileno, que ya avanza en esa dirección con la Estrategia Nacional de Calor y Frío y el Plan Nacional de Eficiencia Energética.

12.1.2 Análisis regulatorio y normativo nacional

Las instalaciones interiores de gas natural deben cumplir lo dispuesto en el Decreto Supremo N° 66 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles de Chile; la norma regulatoria se mantiene vigente desde el año 2007, y regula la ubicación y características de las instalaciones. En cuanto a los equipos que dan naturaleza a este proyecto, las Bombas de Calor, no existe una norma específica, salvo que debe ser equipo eléctrico certificado como cualquier electrodoméstico por la SEC.

La agenda energética 2022 - 2026 del Gobierno de Chile establece 8 ejes orientados a fomentar la eficiencia energética; específicamente, en el ítem 1.1.3, cita: “Desarrollaremos una estrategia a largo plazo para apoyar la renovación energética del parque construido de edificaciones, tanto públicos como privados”. El objetivo es que estas edificaciones existentes alcancen altos niveles de eficiencia energética, con energía neta cero al 2050”. Este marco garantiza un entorno legislativo favorable para iniciativas como las presentadas en el presente proyecto.

12.1.3 Ley de Eficiencia Energética (2021)

Establece que grandes consumidores de energía deberán implementar **Sistemas de Gestión de Energía** y reportar su consumo. Esto abre una oportunidad para que la electrificación térmica se convierta en una **medida prioritaria de reducción de consumo y emisiones**, especialmente en sectores intensivos como minería, alimentos y construcción.

Programas e instrumentos complementarios

- **Guía para el Usuario de Bombas de Calor (Ministerio de Energía y GIZ):** documento técnico que orienta sobre la instalación, operación y beneficios de las bombas de calor para distintos sectores.
- **Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE):** aunque centrado en edificaciones, exige que parte de la demanda de agua caliente sanitaria se cubra con **energías renovables**, habilitando el uso de bombas de calor como tecnología elegible.
- **Protocolos de la SEC (Superintendencia de Electricidad y Combustibles):** establecen requisitos técnicos y de seguridad para la comercialización e instalación de bombas de calor eléctricas en Chile.

12.1.4 Marco normativo nacional: políticas públicas que impulsan la electrificación térmica en Chile

Chile ha avanzado significativamente en el diseño de políticas públicas orientadas a la **eficiencia energética**, la **descarbonización del sector térmico** y el **fomento de tecnologías limpias** como las bombas de calor. Estas políticas establecen un entorno propicio para la electrificación de procesos industriales y residenciales, alineándose con los compromisos climáticos del país hacia la carbono neutralidad al 2050.

12.1.5 Estrategia Nacional de Calor y Frío (2021)

Elaborada por el **Ministerio de Energía** y la **Agencia de Sostenibilidad Energética**, esta estrategia establece una hoja de ruta para descarbonizar la generación de calor y frío en Chile. Sus metas incluyen:

- Que al **año 2050**, el **80% del calor y frío** se genere a partir de **fuentes sostenibles**.
- Reducir en un **65% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** asociadas a usos térmicos.
- Que al menos el **75% de las viviendas** satisfagan sus necesidades térmicas mediante **soluciones sostenibles**.

La estrategia promueve explícitamente el uso de **bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas**, junto con otras tecnologías como **solar térmica** y **biomasa moderna**, enfocándose tanto en el sector residencial como en el comercial e industrial.

12.1.6 Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022–2026

Este plan establece objetivos específicos para **reducir la intensidad energética** en los sectores productivos, incentivando la adopción de tecnologías de alto rendimiento como las **bombas de calor**. Algunas medidas destacadas incluyen:

- Diagnósticos energéticos y auditorías financiadas en PYMES e industrias.
- Programas de cofinanciamiento para **recambio de sistemas térmicos contaminantes**.
- Integración de eficiencia energética en instrumentos normativos como la **Ley de Eficiencia Energética (Ley 21.305)**.

12.1.7 Presiones actuales sobre la industria para la descarbonización

La industria chilena se encuentra en un contexto de **presión creciente para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** y avanzar hacia una matriz energética más limpia y sostenible. Esta presión proviene tanto de marcos regulatorios internos como de compromisos sectoriales e internacionales, además de las expectativas del mercado y la ciudadanía.

12.1.8 Ley Marco de Cambio Climático (Ley 21.455)

Promulgada en 2022, esta ley establece la meta nacional de **neutralidad de**

carbón al año 2050, exigiendo que todos los sectores económicos —incluyendo la industria— implementen medidas concretas de mitigación y adaptación al cambio climático. La ley crea obligaciones específicas para grandes emisores y define instrumentos de planificación como los Planes Sectoriales de Mitigación.

12.1.9 Plan de Descarbonización del Sector Energético

El Ministerio de Energía ha trazado una hoja de ruta para el **retiro progresivo de las centrales a carbón**, proyectando que **el 50% de estas unidades será retirado para 2025**. Esta política impulsa un cambio estructural hacia tecnologías eléctricas más limpias, como las **bombas de calor** para generación de calor en procesos industriales.

Compromisos del sector minero

Empresas agrupadas en el **Consejo Minero** han adoptado metas propias de sostenibilidad. Destaca la reducción del **70% de las emisiones de alcance 1 y 2 al año 2030**, y la meta de **carbón neutralidad al 2050**, con foco en electrificación de procesos, eficiencia energética e incorporación de energías renovables.

Tendencias globales del mercado

La industria exportadora chilena, especialmente en sectores como la minería, alimentos y manufacturas, enfrenta crecientes **exigencias de sus clientes internacionales** en cuanto a la huella de carbono de los productos. Esta presión genera incentivos para incorporar tecnologías de baja emisión como las bombas de calor, no solo por razones ambientales, sino también competitivas.

Presión social y ambiental

El fortalecimiento de la participación ciudadana y el aumento del activismo ambiental han contribuido a un escrutinio más intenso sobre el desempeño ambiental de las empresas. Esto ha impulsado a muchas industrias a adoptar compromisos voluntarios y acelerar sus procesos de transición energética.

13. PROYECTO DE LEY DISTRIBUCIÓN

La ley de distribución que actualmente sigue en tramitación en el Congreso de Chile se conoce como el proyecto de ley de reforma a la distribución eléctrica, también llamado informalmente "Ley de Distribución". Esta iniciativa busca modernizar el segmento de distribución eléctrica, promoviendo mayor eficiencia, transparencia y equidad en la fijación de tarifas para los usuarios regulados.

Aunque ya se han aprobado leyes relacionadas —como la Ley N° 21.667, que modifica aspectos tarifarios y de estabilización para clientes regulados— la reforma estructural al sistema de distribución aún está en discusión legislativa. Esta reforma apunta a:

- Cambiar el modelo de rentabilidad garantizada por uno más competitivo.
- Incentivar la calidad de servicio y la inversión en redes inteligentes.
- Establecer mecanismos más justos para la fijación de tarifas de distribución.

Esta ley es clave para el futuro del sistema eléctrico chileno, especialmente en el contexto de la transición energética y la descentralización de la generación.

13.1 Estado actual del proyecto de ley de distribución eléctrica

La Comisión de Energía y Minería del Senado acordó en agosto de 2024 formar una mesa técnica con el Ejecutivo y empresas distribuidoras para trabajar en una reforma estructural al sistema de distribución.

Esta decisión se tomó tras los extensos cortes de suministro eléctrico ocurridos en la zona centro-sur, lo que evidenció deficiencias en la regulación actual.

El objetivo es modernizar el modelo de distribución, asegurar continuidad del suministro y mejorar la calidad del servicio.

Se espera que el trabajo técnico comience formalmente en octubre, con participación transversal de actores públicos y privados.

Además del proyecto estructural, hay otras mociones en curso:

- Un proyecto de ley (Boletín N° 16.977-08) busca **obligar a las empresas eléctricas a presentar planes anuales de mantención y poda de árboles** para evitar cortes por temporales.

- Esta moción está en **primer trámite constitucional** en la Comisión de Minería y Energía de la Cámara de Diputadas y Diputados.

14. CONCLUSIONES

Sin lugar a duda, la tecnología de bomba de calor es hoy en día, la que nos permitirá en el corto plazo cumplir y perseguir los objetivos y metas de descarbonización nacional mediante la electrificación de procesos térmicos.

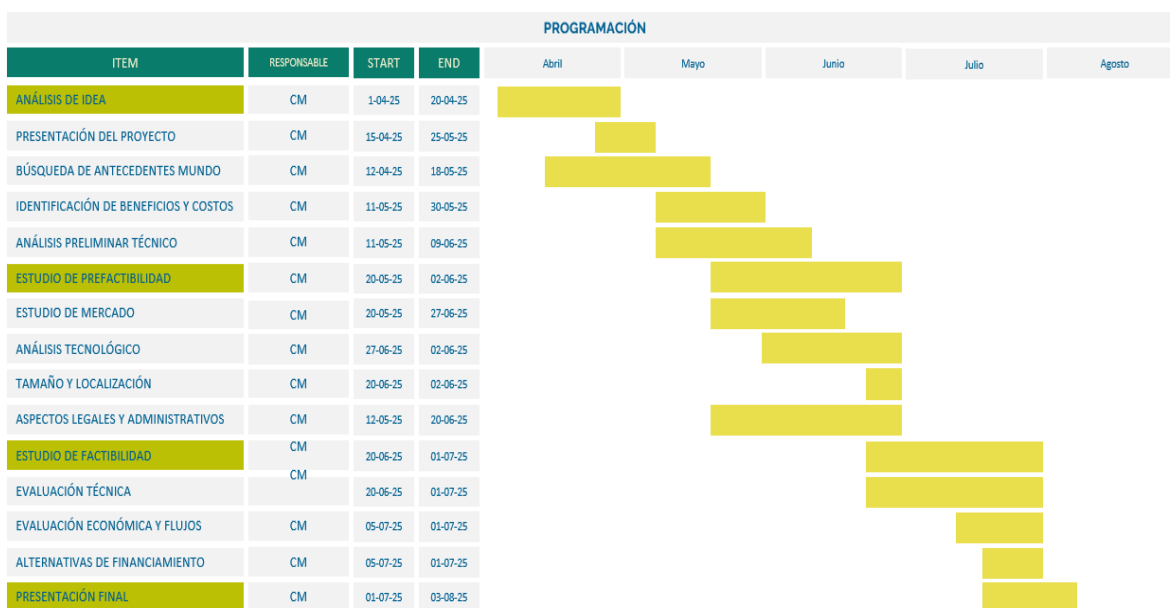
Desarrollos residenciales de electrificación a baja escala han permitido cuantificar los beneficios económicos, ambientales y confiabilidad operacional de los nuevos sistemas térmicos. No obstante, han surgido limitaciones por suministros de empalmes y redes de distribución que nos llevan a plantear el que, tal vez, una masificación acelerada, puede saturar y provocar problemas de suministro convencional a nivel nacional.

El resultado de simulaciones eléctricas requeridas para electrificar las demandas térmicas declaradas, incluso erróneamente por las industrias, permite abordar la magnitud del problema de suministro energético en que nos encontramos como país.

Es por lo anterior, que un detallado estudio del proyecto actual “Reforma de distribución eléctrica” debe ser analizado para tomar claridad de su alcance respecto a las dificultades que nos enfrentaremos por el cumplimiento de metas climáticas, ecológicas y sustentables.

15. ANEXOS

15.1 Carta Gantt



16. REFERENCIAS

- **Agencia de Sostenibilidad Energética (2021).**
Guía de Tecnologías de Energía Sustentable para la Industria y el Comercio en Chile.

<https://www.sustentabilidadenergetica.cl>

1. • **Ministerio de Energía de Chile (2021).**
Estrategia Nacional de Energía 2050.
<https://energia.gob.cl>
2. • **Fraunhofer ISI (2021).**
Industrial Heat Pumps – Impact on Decarbonisation and Energy Efficiency.
<https://www.isi.fraunhofer.de>

3. • **International Energy Agency – IEA (2022).**
The Future of Heat Pumps.
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
4. • **Renewable Thermal Collaborative (2023).**
Electrifying Industrial Heating Systems: Barriers, Opportunities, and Market Drivers.
<https://www.renewablethermal.org>
5. • **ThinkGeoEnergy (2024).**
High-Temperature Heat Pumps and Industrial Thermal Demand.
<https://www.thinkgeoenergy.com>
6. • **McKinsey & Company (2024).**
Industrial Decarbonization: Pathways to Reducing Emissions from Heat.
<https://www.mckinsey.com>
7. • **Climatización Sustentable (2024).**
Panorama del mercado de bombas de calor en Chile y América Latina.
<https://climatizacionsustentable.cl>
8. • **Banco Central de Chile (2024).**
Producto Interno Bruto Regional, año 2023.
<https://www.bcentral.cl/contenido/-/details/producto-interno-bruto-regional-2023>
9. • **Blogit Noticias (2024).**
Las 10 industrias que más aportan al PIB chileno.
<https://blogitnoticias.com/10-industrias-mas-aportan-pib-chile>
10. • **MCH – Minería Chilena (2023).**
Reporte de consumo energético en minería y eficiencia térmica.
<https://www.mch.cl>
11. • **GEOTERMIKA (2024).**
Aplicación de bombas de calor en procesos industriales chilenos.
<https://www.geotermika.cl>
12. • **Ministerio de Energía de Chile:** El estudio de mercado de bombas de calor proporciona información detallada sobre las aplicaciones y beneficios de estas tecnologías en el país. energia.gob.cl
13. • **ACR Latinoamérica:** Ofrece análisis sobre las bombas de calor de alta temperatura como reemplazo de calderas, destacando su eficiencia y adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas. acrlatinoamerica.com
14. • **EISA:** Proporciona soluciones de arriendo de bombas de calor para generación de agua caliente, facilitando la transición desde sistemas de calderas tradicionales.
eisa.cl
15. PCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*
Intergovernmental Panel on Climate Change.
16. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. *Factores de Emisión para Evaluaciones de Proyectos con Energías Renovables, 2022.*



17. Ministerio de Energía de Chile. *Balance Nacional de Energía 2020*. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2022_informe_anual_bne_2020.pdf
18. IEA (2023). *Tracking Clean Energy Progress*. International Energy Agency.
19. Renewable Thermal Collaborative (2023). *Guide to Industrial Heat Pumps*.
20. Fraunhofer ISE (2021). *High Temperature Heat Pumps for the Industry*.
21. IEA Bioenergy (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Biomass-based Heating Systems*.
22. <https://www.mundocompresor.com/maquinaria-equipos-mecanicos-noticias/man-energy-bomba-calor-aire-agua-mas-grande-mundo>
23. <https://www.gea.com/es/products/heat-pumps/customized-heat-pumps-fx-p/>
24. <https://oilon.com/es/productos/bombas-de-calor-industriales-oilon-chillheat/>
25. https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/06/Eficiencia-Energetica-ACS_Antucoya_GIZ_publico.pdf