

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

ANÁLISIS INTEGRAL DEL IMPACTO SOCIAL, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL CIERRE O RECONVERSIÓN DE CENTRALES TÉRMICAS A CARBÓN EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

IGNACIA CABRALES RAMOS

PROFESORA GUÍA

MARÍA PILAR GÁRATE CHATEAU

SANTIAGO DE CHILE, OCTUBRE DE 2026

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: Análisis integral del impacto social, económico y ambiental del cierre o reconversión de centrales térmicas a carbón en Chile

Nombre del candidato(a): Ignacia Belén Cabrales Ramos

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Vitacura **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Pilar Gárate Chateau, 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)

☒ 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: 29/10/2026 **Firma:** Pilar Gárate Ch.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/10/2026 **Firma:** Ignacia

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.

1. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por acompañarme e impulsarme durante todo este proceso. Gracias por confiar en mí, por darme fuerza cuando más la necesitaba y por no dejarme rendir cuando las cosas se hacían difíciles. Especialmente a mi mamá y a mi papá, por todos los esfuerzos que han hecho por mí, por creer siempre en mis capacidades y por darme las herramientas para llegar hasta aquí. Gran parte de este logro también es de ustedes.

A Álvaro, mi pareja y compañero en este camino, por estar a mi lado en los buenos momentos y también cuando todo se hacía más difícil. Gracias por escucharme, aconsejarme y confiar siempre en mí, incluso cuando yo misma dudaba, por recordarme tantas veces que era capaz de lograrlo y por la forma en que siempre supimos apoyarnos y animarnos para seguir avanzando.

A mis amigos, por acompañarme durante estos años y por estar presentes de distintas formas a lo largo de este camino. Gracias por las risas, el apoyo y por ser parte de una etapa tan importante de mi vida.

A mi profesora guía, por su disposición y apoyo durante este proceso, y por ayudarme a llegar a esta última etapa de mi carrera.

Finalmente, quiero agradecerme a mí misma. Por seguir adelante, por no rendirme y volver a intentarlo cada vez que fue necesario. Por esforzarme, equivocarme, aprender y crecer en el proceso. También por haber sabido disfrutar los momentos lindos y superar los más difíciles. Hoy puedo mirar hacia atrás con orgullo por todo lo vivido y por haber llegado hasta aquí sin dejar de creer en mí, llevándome logros, aprendizajes y recuerdos que siempre formarán parte de este camino.

2. RESUMEN EJECUTIVO

El proceso de descarbonización del sistema eléctrico chileno ha impulsado el cierre progresivo de centrales termoeléctricas a carbón. Sin embargo, estas decisiones pueden generar impactos relevantes en los territorios donde operan, por lo que la reconversión tecnológica surge como una alternativa al cierre definitivo.

Esta investigación analiza los impactos económicos, sociales y ambientales asociados al cierre y reconversión de centrales termoeléctricas, utilizando como caso de estudio la Central Termoeléctrica Guacolda. Se compara su cierre con una reconversión mediante co-combustión con amoníaco verde, aplicando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) a partir de información secundaria y siete criterios de evaluación. Además, se incorpora un análisis de sensibilidad para examinar la estabilidad de los resultados.

La reconversión obtiene una prioridad global de 50,90 %, frente al 49,09 % del cierre, con una diferencia de solo 1,81 puntos porcentuales. Esto evidencia una preferencia estrecha y sensible a cambios en las condiciones evaluadas. Entre los factores que pueden modificar la priorización destacan las condiciones asociadas al amoníaco verde, el mercado laboral de Huasco y el desempeño ambiental.

Como principal aporte, la investigación desarrolla una estructura metodológica que integra criterios económicos, sociales y ambientales y que puede servir como base adaptable para evaluar otras centrales termoeléctricas que enfrenten decisiones similares dentro del proceso de descarbonización chileno.

Palabras clave: descarbonización, centrales termoeléctricas a carbón, reconversión, amoníaco verde, AHP, evaluación multicriterio, Guacolda.

3. ABSTRACT

The decarbonization of the Chilean electricity system has promoted the progressive closure of coal-fired power plants. However, these decisions may generate significant impacts on the territories where these facilities operate, making technological conversion an alternative to permanent closure.

This study analyzes the economic, social, and environmental impacts associated with the closure and conversion of coal-fired power plants, using the Guacolda Power Plant as a case study. Its permanent closure is compared with a conversion alternative based on green ammonia co-firing, applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) using secondary information and seven evaluation criteria. A sensitivity analysis is also conducted to assess the stability of the results.

The conversion alternative obtains a global priority of 50.90%, compared with 49.09% for closure, resulting in a difference of only 1.81 percentage points. This indicates a narrow preference that is sensitive to changes in the evaluated conditions. Key factors that may modify prioritization include the cost and availability of green ammonia, labor market conditions in Huasco, and environmental performance.

As its main contribution, this research develops a methodological framework that integrates economic, social, and environmental criteria and can serve as an adaptable basis for evaluating other coal-fired power plants facing similar decisions within Chile's decarbonization process.

Keywords: decarbonization, coal-fired power plants, conversion, green ammonia, AHP, multicriteria evaluation, Guacolda.

4. ÍNDICE

1. AGRADECIMIENTOS 2
2. RESUMEN EJECUTIVO 4
3. ABSTRACT 5
4. ÍNDICE 6
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 8
6. OBJETIVOS 10
6.1. Objetivo General 10
6.2. Objetivos Específicos 10
7. MARCO TEÓRICO 11
7.1. Contexto energético global 11
7.1.1. Cambio climático y transición energética 12
7.1.2. Acuerdos internacionales y carbono neutralidad 15
7.2. Contexto energético chileno 16
7.2.1. Sistema energético chileno 16
7.2.2. Centrales termoeléctricas a carbón y sus impactos 18
7.2.3. Plan de descarbonización en Chile 20
7.3. Alternativas para la descarbonización de centrales 23
7.3.1. Cierre definitivo de centrales a carbón 24
7.3.2. Reconversión de centrales térmicas 25
7.3.3. Tecnologías y experiencias de reconversión 26
7.4. Evaluación multicriterio para la toma de decisiones 27
7.4.1. Evaluación integral de proyectos energéticos 28
7.4.2. Análisis multicriterio (MCDA) 28
7.4.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP) 29
8. METODOLOGÍA 33
8.1. Diseño de la investigación y caso de estudio 33
8.2. Definición de alternativas 36
8.3. Criterios de evaluación 37
8.4. Aplicación del método AHP 44
8.4.1. Determinación de las ponderaciones de los criterios 45
8.4.2. Evaluación de las alternativas y obtención de la prioridad global 53
8.4.3. Análisis de sensibilidad 57
9. ALCANCE 60

10. RESULTADO 61
10.1. Fundamentación de las comparaciones entre criterios 61
10.2. Ponderación de los criterios 69
10.3. Evaluación de las alternativas por criterio 75
10.4. Priorización global de las alternativas 90
10.5. Análisis de sensibilidad 93
10.5.1. Sensibilidad de las ponderaciones de los criterios 93
10.5.2. Sensibilidad del desempeño de las alternativas 100
10.6. Discusión de los resultados 107
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 110
11.1. Conclusiones generales e implicancias de la evaluación 110
11.2. Reconversión, aporte y replicabilidad de la metodología 111
11.3. Recomendaciones 112
12. LIMITACIONES 113
13. REFERENCIAS 115
14. ANEXOS 127

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El cierre de las centrales a carbón en Chile ha sido impulsado principalmente por sus impactos negativos en el medioambiente, las emisiones de CO_2 y la salud pública, en el marco de la transición energética nacional. No obstante, este proceso también ha generado profundos efectos sociales y económicos en las comunidades donde operan estas plantas, produciendo pérdida de empleos, migración de familias y debilitamiento de la economía local. Diversos estudios han demostrado que los proyectos termoeléctricos generan conflictos sociales y ambientales en áreas de alto valor ecológico y económico, afectando tanto la biodiversidad como la salud y estabilidad de las comunidades locales (Cárcamo et al., 2011).

Además, la presencia prolongada de industrias altamente contaminantes como las termoeléctricas se ha vinculado con el deterioro de la calidad de vida y un aumento de enfermedades crónicas en las poblaciones expuestas, lo que refuerza la necesidad de abordar el problema no solo desde una perspectiva ambiental, sino también social (Barría, 2009). Ante esta situación, surgen propuestas que no se limitan al cierre de estas centrales, sino que promueven alternativas de reconversión tecnológica, incluyendo biomasa, gas natural, sales fundidas, o blending con hidrógeno, como vías para reducir emisiones y avanzar hacia un sistema eléctrico más sostenible (Araya, 2024).

El propio Estado de Chile ha reconocido la importancia de este desafío, señalando que el retiro y reconversión de centrales debe ser un proceso gradual, acompañado de políticas de transición justa que resguarden el empleo y minimicen los efectos sociales en las comunidades directamente impactadas (Ministerio de Energía, 2024).

De este modo, resulta necesario estudiar y cuantificar el impacto social, económico y ambiental derivado del cierre de las centrales térmicas a carbón y del proceso de reconversión, con especial énfasis en la pérdida de empleos, la estabilidad social y la calidad de vida en las comunidades afectadas. Para ello, se debe considerar el rol de los agentes involucrados, trabajadores, familias locales, autoridades y empresas energéticas, a fin de comprender cómo enfrentan este proceso y qué expectativas tienen respecto a una eventual reconversión.

En este contexto, surgen interrogantes fundamentales como: ¿cuáles son los principales impactos económicos, sociales y ambientales asociados al cierre de una central termoeléctrica a carbón?, ¿en qué medida la reconversión de estas instalaciones puede reducir los efectos negativos asociados a su cierre y contribuir al proceso de descarbonización?, y ¿cómo pueden compararse de manera integral las alternativas de cierre y reconversión considerando simultáneamente sus implicancias económicas, sociales y ambientales?

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo General

Analizar los impactos económicos, sociales y ambientales asociados al cierre o a la reconversión de centrales termoeléctricas a carbón, mediante un estudio comparativo de ambas alternativas, con el propósito de determinar cuál presenta una mayor valoración integral como alternativa dentro del proceso de descarbonización.

6.2. Objetivos Específicos

Evaluar Evaluar los impactos ambientales asociados al cierre y reconversión de centrales termoeléctricas a carbón, considerando la regulación vigente y los compromisos de descarbonización.

Analizar las implicancias económicas de ambas alternativas, considerando su viabilidad y capacidad de mantener o generar valor en el tiempo.

Evaluar los efectos sociales del cierre y la reconversión sobre los trabajadores y las comunidades vinculadas al funcionamiento de las centrales.

Identificar las principales alternativas de reconversión tecnológica para centrales termoeléctricas a carbón y su potencial frente al cierre.

Comparar el cierre y la reconversión mediante una evaluación conjunta de criterios económicos, sociales y ambientales, determinando la prioridad relativa de cada alternativa.

Analizar la sensibilidad de los resultados frente a cambios en las variables más influyentes, identificando aquellas variaciones capaces de modificar la preferencia entre las alternativas.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Contexto energético global

La energía desempeña un rol fundamental en el desarrollo económico y social a nivel mundial, siendo esencial para el funcionamiento de sectores como la industria, el transporte, los servicios y el consumo residencial. Durante las últimas décadas, el crecimiento de la población, la urbanización y el aumento de la actividad económica han impulsado un incremento sostenido en la demanda energética global. En este contexto, la International Energy Agency (IEA, 2025) señala que la demanda mundial de energía creció un 2,2% durante 2024, cifra superior al promedio anual de crecimiento de 1,3% registrado entre 2013 y 2023. Asimismo, más del 80% de este aumento fue impulsado por economías emergentes y en desarrollo, reflejando la creciente necesidad energética asociada al crecimiento económico y productivo a nivel global.

De manera complementaria, la demanda mundial de electricidad presentó un crecimiento aún más acelerado. Según la IEA (2025), el consumo global de electricidad aumentó un 4,3% durante 2024, superando ampliamente el promedio observado durante la última década, como muestra la Figura 1.

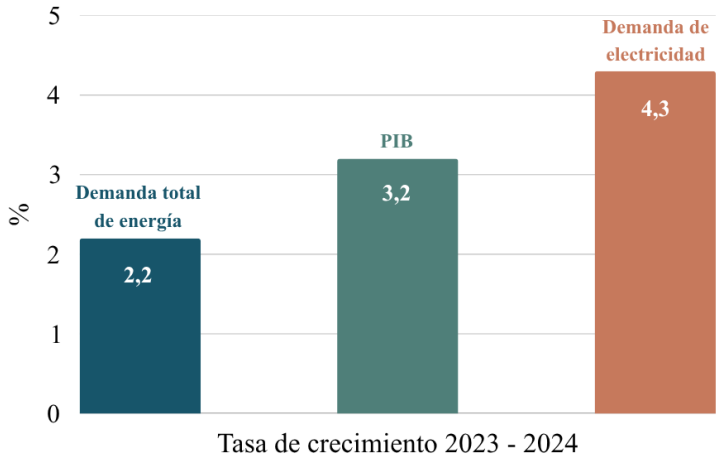


Figura 1. Tasa de crecimiento global de la demanda total de energía, PIB y demanda eléctrica entre 2023 y 2024. [Fuente: Elaboración propia a partir de IEA (2025)].

Entre los principales factores que explican este incremento se encuentran la expansión de procesos de electrificación, el aumento del uso de sistemas de climatización, el crecimiento de los centros de datos y el avance de nuevas tecnologías digitales. En consecuencia, el sistema energético mundial enfrenta actualmente el desafío de responder a una demanda energética creciente, manteniendo simultáneamente la seguridad del suministro y la sostenibilidad de los sistemas de generación.

7.1.1. Cambio climático y transición energética

El crecimiento sostenido de la demanda energética mundial ha estado históricamente acompañado por una alta dependencia de combustibles fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural. Como consecuencia, el sector energético se ha convertido en una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel global. Según la International Energy Agency (2025), las emisiones energéticas de dióxido de carbono (CO_2) alcanzaron un nuevo máximo histórico de 37,8 gigatoneladas durante 2024, registrando un incremento de aproximadamente 0,8% respecto al año anterior.

De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), las actividades humanas han provocado un aumento significativo de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero desde la Revolución Industrial, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el principal responsable del calentamiento global. Estos gases poseen la capacidad de retener parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, intensificando el efecto invernadero natural y contribuyendo al aumento de la temperatura media global.

La Figura 2, muestra el crecimiento sostenido de las emisiones globales de CO_2

durante el período 1900–2024, alcanzando aproximadamente 37,6 Gt CO_2 en 2024. Esto evidencia el impacto que ha tenido el aumento del consumo energético y la dependencia histórica de combustibles fósiles sobre las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (International Energy Agency, 2025).

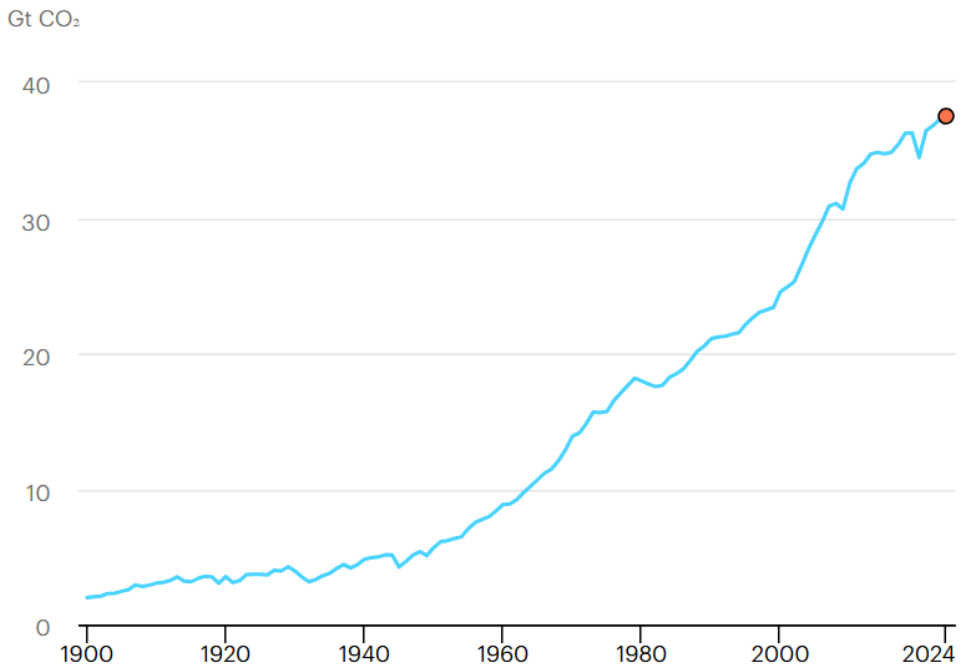


Figura 2. Evolución de las emisiones globales de CO_2 provenientes de la combustión de energía y procesos industriales (1900–2024). [Fuente: International Energy Agency, 2025].

El sector energético desempeña un rol particularmente relevante dentro de este fenómeno. Según las Naciones Unidas (2024), aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones globales de gases de efecto invernadero provienen de la producción y consumo de energía. En consecuencia, la creciente demanda energética observada durante las últimas décadas ha contribuido directamente al aumento de las emisiones globales, generando una creciente preocupación internacional respecto a los impactos ambientales, económicos y sociales asociados al cambio climático.

Ante los desafíos asociados al cambio climático y al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, numerosos países han impulsado procesos de

transición energética orientados a reducir la dependencia de combustibles fósiles e incrementar la participación de fuentes de energía de bajas emisiones. De acuerdo con la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2024), la transición energética constituye uno de los principales mecanismos para alcanzar los objetivos climáticos internacionales y avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles.

En este contexto, la descarbonización del sector energético se ha convertido en una prioridad global, promoviendo la sustitución progresiva de tecnologías intensivas en emisiones por alternativas renovables y sistemas energéticos más limpios. Según la International Energy Agency (2025), las energías renovables representaron aproximadamente el 38% del crecimiento de la demanda energética mundial durante 2024, constituyéndose como la principal fuente de expansión energética a nivel global. En contraste, el carbón aportó cerca del 15% del crecimiento de la demanda energética mundial, evidenciando que, si bien continúa siendo una fuente relevante dentro de la matriz energética global, su participación resulta cada vez menor frente al avance de tecnologías de menor impacto ambiental.

La Figura 3, muestra que las energías renovables fueron la principal fuente asociada al crecimiento de la demanda energética mundial en 2024, seguidas por el gas natural, el carbón, el petróleo y la energía nuclear. Según la International Energy Agency (2025), esto refleja el avance de fuentes de menor emisión, aunque los combustibles fósiles aún mantienen una participación relevante en el abastecimiento energético global.

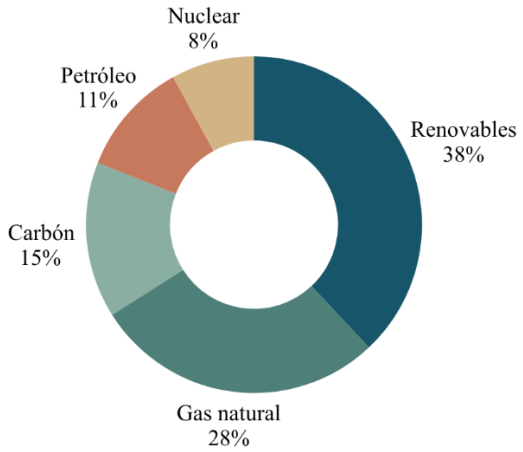


Figura 3. Participación de las distintas fuentes energéticas en el crecimiento de la demanda energética mundial durante 2024. [Fuente: Elaboración propia a partir de IEA (2025)].

Como resultado, la transición energética actual se caracteriza por una creciente incorporación de energías renovables, mejoras en eficiencia energética y el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento y gestión energética, con el objetivo de reducir las emisiones del sector energético y avanzar hacia economías con menores niveles de carbono.

7.1.2. Acuerdos internacionales y carbono neutralidad

Como respuesta a los desafíos climáticos y energéticos identificados durante las últimas décadas, la comunidad internacional ha impulsado diversos acuerdos orientados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre ellos destaca el Acuerdo de París, adoptado en 2015 por 196 países, cuyo objetivo es mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de 2°C respecto de los niveles preindustriales y realizar esfuerzos para limitarlo a 1,5°C (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2015).

En línea con estos compromisos, numerosos países han establecido metas de carbono neutralidad para mediados del siglo XXI. De acuerdo con las Naciones Unidas (2024), la carbono neutralidad se alcanza cuando las emisiones generadas son

equivalentes a las emisiones removidas o compensadas, logrando emisiones netas iguales a cero. Asimismo, el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023) indica que alcanzar emisiones netas de CO_2 cercanas a cero hacia 2050 constituye una condición fundamental para limitar el calentamiento global a 1,5°C.

Estos compromisos han servido como marco de referencia para el desarrollo de políticas energéticas y ambientales orientadas a reducir progresivamente la dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia sistemas energéticos con menores emisiones.

7.2. Contexto energético chileno

7.2.1. Sistema energético chileno

El sistema energético chileno comprende las actividades de producción, transformación, transporte y consumo de energía necesarias para abastecer las necesidades de los distintos sectores económicos y de la población. Debido a la limitada disponibilidad de combustibles fósiles a nivel nacional, Chile ha dependido históricamente de la importación de recursos energéticos, situación que ha influido en la evolución de su matriz energética y en la planificación del sector energético nacional (Ministerio de Energía, 2022).

La matriz energética nacional corresponde al conjunto de fuentes utilizadas para satisfacer la demanda total de energía del país, incluyendo combustibles fósiles, biomasa, electricidad y fuentes renovables. Esta matriz permite visualizar el origen de la energía consumida en Chile y su distribución entre los distintos sectores económicos.

La Figura 4, muestra las principales fuentes energéticas utilizadas en Chile y su distribución hacia los distintos sectores de consumo. Se observa una importante participación de combustibles fósiles, especialmente petróleo, gas natural y carbón,

junto con el aporte de fuentes renovables como la energía solar, eólica e hidráulica.

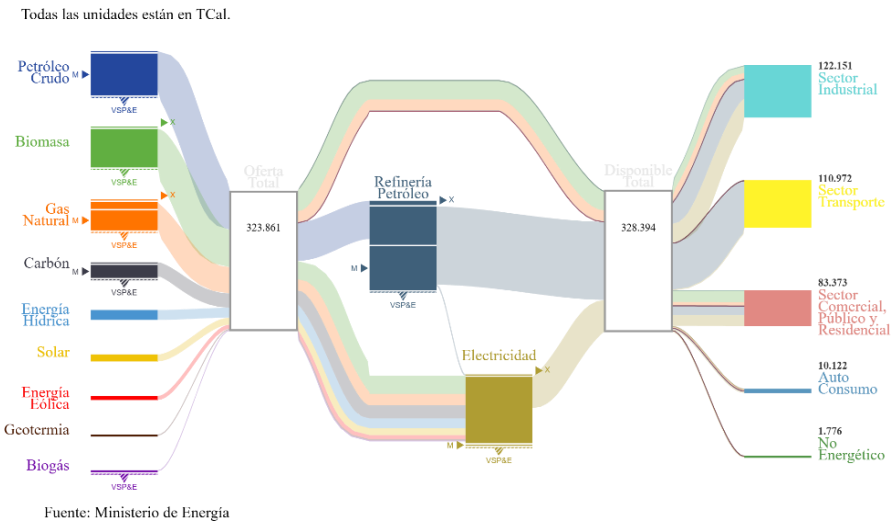


Figura 4. Balance Energético nacional de Chile y distribución de fuentes energéticas por sector de consumo en el año 2024. [Fuente: Ministerio de Energía (2024), Balance Nacional de Energía.]

Por su parte, la matriz eléctrica representa específicamente las fuentes utilizadas para la generación de electricidad. A diferencia de la matriz energética, esta considera únicamente las tecnologías destinadas a producir energía eléctrica para abastecer al Sistema Eléctrico Nacional.

La Figura 5, presenta la composición de la capacidad instalada de generación eléctrica en Chile según tecnología para los años 2015, 2023 y 2024. Se observa una disminución de la participación relativa de las tecnologías convencionales, particularmente el carbón, junto con un aumento sostenido de las fuentes renovables, especialmente la energía solar y eólica. Esta evolución refleja el proceso de transición energética que ha experimentado el país durante la última década y permite contextualizar el rol histórico de las centrales termoeléctricas dentro del sistema eléctrico nacional.

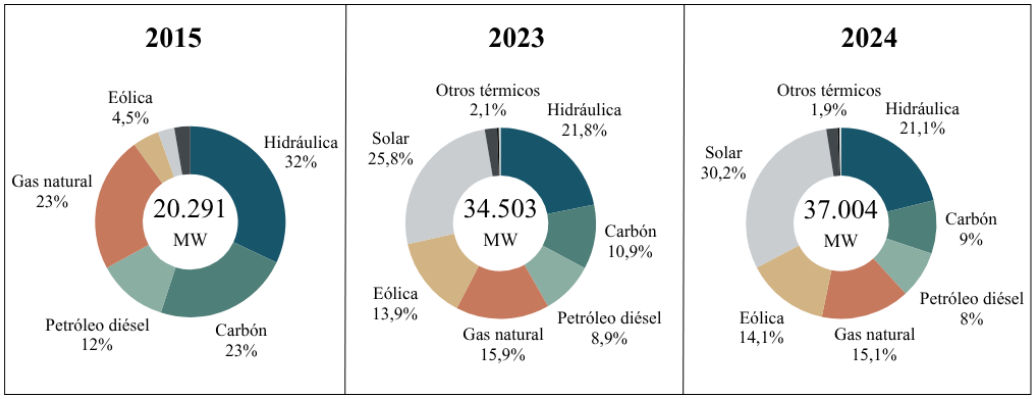


Figura 5. Participación de las tecnologías de generación en la capacidad instalada del sistema eléctrico chileno. [Fuente: Elaboración propia a partir de Comisión Nacional de Energía (CNE)].

El suministro eléctrico del país se encuentra integrado principalmente a través del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que concentra la mayor parte de la generación, transmisión y distribución eléctrica de Chile. Según el Coordinador Eléctrico Nacional (2026), el SEN abastece aproximadamente al 98,5% de la población nacional, constituyéndose como la principal infraestructura para el suministro eléctrico del país.

La composición de la matriz energética y eléctrica nacional resulta fundamental para comprender la evolución del sistema energético chileno y el rol que han desempeñado las centrales termoeléctricas a carbón dentro de la generación eléctrica nacional, aspecto que se aborda en los apartados siguientes.

7.2.2. Centrales termoeléctricas a carbón y sus impactos

Las centrales termoeléctricas a carbón generan electricidad mediante un ciclo de vapor. El carbón es recibido, almacenado y preparado antes de ingresar al sistema de combustión de la caldera, donde el calor producido permite transformar agua en vapor a alta presión. Posteriormente, este vapor acciona una turbina conectada a un generador eléctrico y, una vez utilizada su energía, es enfriado en un condensador para retornar al ciclo. Además de estos equipos principales, la instalación cuenta con

sistemas auxiliares para el manejo del carbón y las cenizas, refrigeración, tratamiento de agua, control de emisiones atmosféricas y conexión eléctrica al sistema. En conjunto, estos elementos conforman la infraestructura principal necesaria para la generación termoeléctrica a carbón (Pauschert, 2009).

La Figura 6 presenta de manera simplificada el funcionamiento de una central termoeléctrica a carbón, mostrando los principales equipos que intervienen desde la combustión hasta la generación de electricidad y la posterior condensación del vapor.

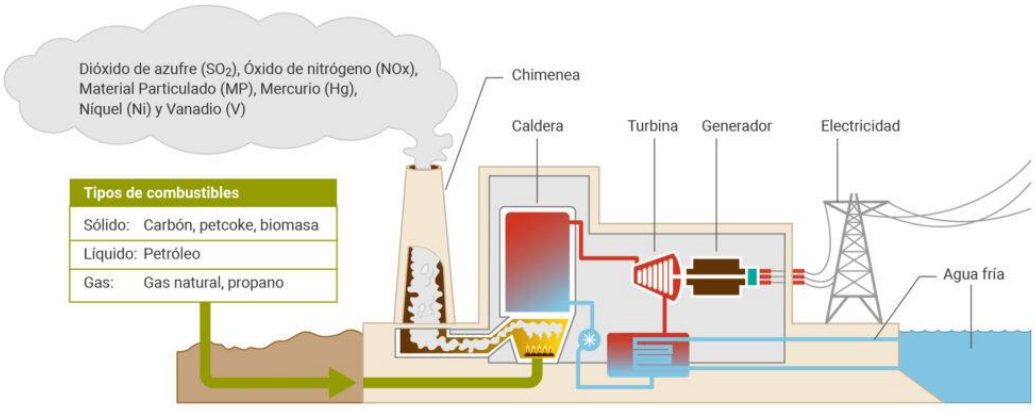


Figura 6. Esquema simplificado del funcionamiento de una central termoeléctrica a carbón. [Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de Chile (s. f.).]

En Chile, estas centrales han tenido un rol relevante dentro del sistema eléctrico, especialmente por su capacidad de entregar generación continua y aportar seguridad de suministro. Según la Comisión Nacional de Energía (2024), en 2024 el carbón representó aproximadamente un 9 % de la capacidad instalada de generación eléctrica bruta nacional, cifra menor al 23 % registrado en 2015, lo que evidencia una reducción progresiva de su participación relativa dentro del sistema eléctrico chileno.

Además de los impactos ambientales, estas centrales también generan efectos sociales y económicos en los territorios donde se ubican. Por una parte, su operación puede estar asociada a empleo local, actividad portuaria, servicios industriales y recaudación comunal. Por otra parte, las comunidades cercanas pueden verse

expuestas a externalidades negativas asociadas a emisiones atmosféricas, acumulación de residuos, uso de agua e impactos sobre la salud y calidad de vida. Por ello, el cierre o reconversión de estas instalaciones no solo debe evaluarse desde una perspectiva energética, sino también considerando sus efectos sociales, económicos y ambientales.

En consecuencia, las centrales termoeléctricas a carbón representan un elemento clave dentro del proceso de descarbonización chileno. Su retiro permite reducir emisiones y avanzar hacia una matriz eléctrica más limpia, pero también plantea desafíos relevantes para la seguridad del suministro, la continuidad laboral y el desarrollo económico de las zonas donde se emplazan.

7.2.3. Plan de descarbonización en Chile

En línea con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático y carbono neutralidad, Chile ha impulsado durante la última década un proceso de descarbonización orientado a reducir progresivamente la participación de las centrales termoeléctricas a carbón dentro de su sistema eléctrico. Este proceso busca disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético, manteniendo simultáneamente la seguridad y continuidad del suministro eléctrico nacional.

Un hito relevante fue la suscripción, en 2019, del Acuerdo de Descarbonización entre el Gobierno de Chile y las principales empresas generadoras del país, mediante el cual se estableció un cronograma para el retiro progresivo de las centrales a carbón en operación. Posteriormente, el Ministerio de Energía incorporó estos compromisos dentro de la Política Energética Nacional, estableciendo como meta avanzar hacia una matriz eléctrica libre de carbón y alcanzar la carbono neutralidad al año 2050 (Ministerio de Energía, 2022).

La Tabla 1, presenta las centrales termoeléctricas a carbón que, a junio de 2023, contaban con compromisos de cierre o reconversión dentro del proceso de descarbonización del sector eléctrico chileno. Se observa que algunas unidades tienen fechas definidas de retiro, mientras que otras consideran procesos de reconversión hacia tecnologías alternativas, evidenciando las distintas estrategias utilizadas para avanzar en la reducción del uso del carbón en la generación eléctrica nacional (Larraín & Melej, 2023).

Tabla 1. Compromisos de cierre de centrales termoeléctricas a carbón en operación a junio de 2023.

Empresa	Nombre Central	Ubicación	Situación	Capacidad
ENGIE	Mejillones CTM1 y CTM2	Mejillones	Compromiso de cierre a dic de 2024.	334 MW
ENGIE	Andinas y Hornitos	Mejillones	Reconversión a biomasa a dic 2025.	351 MW
ENGIE	Infraestructura Energética Mejillones	Mejillones	Reconversión a Gas a diciembre de 2025.	376 MW
AES	**Ventanas 2**	**Puchuncaví**	**Compromiso de cierre a diciembre de 2022. *(NO CUMPLIDO)***	**208 MW**
AES	Norgener NT01 y NT02	Tocopilla	Solicitud a CNE para cierre a diciembre 2025. *(Sin respuesta)*	276 MW
AES	Angamos 1 y 2	Mejillones	Solicitud a CNE para cierre a enero de 2025. *(Sin respuesta)*	558 MW
AES	Nueva Ventanas	Puchuncaví	Solicitud a CNE para cierre a enero 2025. *(Sin respuesta)*	267 MW
AES	Campiche	Puchuncaví	Solicitud a CNE para cierre a enero 2025. *(Sin respuesta)*	270 MW
TOTAL	**12 unidades**			**2.640 MW**

Fuente: Larraín y Melej (2023), Chile Sustentable.

Respecto del cumplimiento de los compromisos presentados en la Tabla 1, se observan avances, aunque también retrasos y modificaciones en los planes originales. Entre los principales hitos destacan los retiros de Ventanas 2 en diciembre de 2023, Norgener en abril de 2024 y las unidades CTM1 y CTM2 en diciembre de 2025. Asimismo, la reconversión de Infraestructura Energética Mejillones a gas natural se concretó en octubre de 2026, mientras que la reconversión a biomasa de Andina y

Hornitos fue reemplazada por una estrategia de retiro de sus unidades. Por otra parte, los cierres de Angamos, Nueva Ventanas y Campiche, inicialmente solicitados para enero de 2025, permanecen pendientes. Estos antecedentes evidencian que el proceso de descarbonización ha avanzado de manera gradual, con ajustes en los plazos y estrategias inicialmente anunciados.

La Tabla 2, presenta las centrales termoeléctricas a carbón que, a junio de 2023, no contaban con compromisos de cierre dentro del cronograma de descarbonización del sector eléctrico chileno. Entre ellas se encuentran las centrales Cochrane, Guacolda y Santa María, las cuales suman una capacidad instalada de 1.687 MW. La permanencia de estas instalaciones dentro del sistema eléctrico nacional evidencia la relevancia que aún posee la generación a carbón y refuerza la necesidad de evaluar alternativas para su futuro desarrollo, tales como el cierre definitivo o su eventual reconversión energética (Larraín & Melej, 2023).

Tabla 2. Centrales termoeléctricas a carbón sin compromiso de cierre en Chile al año 2023.

Empresa	Nombre Central	Ubicación	Situación	Capacidad
AES	Cochrane 1 y 2	Mejillones	Sin compromiso de cierre	550 MW
Capital Advisors	Guacolda: 1,2,3,4 y 5	Huasco	Sin compromiso de cierre	763 MW
Colbún	Santa María	Coronel	Sin compromiso de cierre	374 MW
TOTAL	8 unidades			1.687 MW

Fuente: Larraín y Melej (2023), Chile Sustentable.

Desde la publicación del cronograma presentado anteriormente, el proceso de descarbonización del sector eléctrico chileno ha continuado evolucionando. La versión definitiva del Plan de Descarbonización publicada por el Ministerio de Energía en 2025 actualiza la hoja de ruta para el retiro o reconversión de las centrales a carbón que permanecen en operación. Entre los cambios más relevantes se encuentra Guacolda, para la cual se contempla una trayectoria de reconversión mediante co-combustión con amoníaco, con una participación proyectada de 30% en dos unidades hacia 2030 y de hasta 50% en las cinco unidades hacia 2033. En

contraste, centrales como Cochrane y Santa María continúan sin una fecha individual definitiva de retiro, manteniéndose dentro del horizonte general de eliminación progresiva del carbón del sistema eléctrico chileno (Ministerio de Energía, 2025).

A pesar de los avances alcanzados, el proceso de retiro del carbón aún no se encuentra completamente definido para todas las centrales en operación. Esto mantiene abierto el análisis sobre el futuro de algunas instalaciones, especialmente en aquellos casos donde todavía se evalúan alternativas de cierre o reconversión dentro del proceso de descarbonización nacional.

En este proceso también adquiere relevancia el concepto de transición justa, entendido como la necesidad de avanzar hacia sistemas energéticos de menores emisiones procurando gestionar los efectos sociales y laborales derivados de la transformación productiva. En el caso del retiro de centrales a carbón, esto implica considerar aspectos como la continuidad laboral, la capacitación de los trabajadores, la diversificación económica de los territorios y la participación de las comunidades afectadas. De esta manera, la descarbonización no constituye únicamente un desafío tecnológico y ambiental, sino también un proceso que requiere considerar sus consecuencias sociales y territoriales.

7.3. Alternativas para la descarbonización de centrales

En este contexto, el cierre de centrales a carbón ha dado origen a un creciente debate respecto de las alternativas disponibles para abordar el proceso de descarbonización. Mientras una opción consiste en el retiro definitivo de las instalaciones, otra alternativa corresponde a la reconversión energética de las centrales existentes, aprovechando parte de su infraestructura para nuevos usos energéticos. Esta última alternativa ha adquirido creciente relevancia tanto a nivel

nacional como internacional, debido a su potencial para reducir impactos económicos y sociales asociados al cierre definitivo.

7.3.1. Cierre definitivo de centrales a carbón

El cierre definitivo de una central a carbón implica el cese permanente de su operación y el posterior retiro, desmantelamiento o gestión de la infraestructura existente. En Chile, esta alternativa ya ha sido implementada como parte del proceso de descarbonización. Entre las unidades retiradas se encuentran Tocopilla U12 y U13, Tarapacá, Bocamina I y II, Ventanas I y las unidades U14 y U15 de Tocopilla, entre otras. El Ministerio de Energía reconoce que estos procesos generan beneficios ambientales y de bienestar, pero también desafíos asociados al empleo, capacitación de trabajadores y diversificación productiva de los territorios afectados (Ministerio de Energía, 2022).

Los efectos sociales y económicos constituyen uno de los principales desafíos del cierre. En el caso de Bocamina I, en Coronel, previo a su retiro los trabajadores manifestaron preocupación por la pérdida de puestos laborales; la unidad contaba con 98 trabajadores directos, además de contratistas. Frente al cierre de Bocamina, Enel implementó un plan de transición que contempló oportunidades laborales para sus trabajadores y programas de capacitación para contratistas, evidenciando la necesidad de acompañar el retiro de estas instalaciones con medidas de reconversión laboral (BioBioChile, 2019; Enel, 2022).

Desde la dimensión ambiental y de salud, el retiro de centrales elimina las emisiones asociadas directamente a su operación, representando una oportunidad para disminuir la exposición de las comunidades a contaminantes atmosféricos. Sin embargo, sus efectos deben analizarse considerando las demás fuentes de contaminación presentes en cada territorio. En comunas como Coronel, el Ministerio

del Medio Ambiente mantiene programas de seguimiento de calidad del aire y vigilancia epidemiológica de enfermedades asociadas a la exposición crónica a contaminantes atmosféricos, lo que evidencia la relevancia que adquieren estas dimensiones dentro de los procesos de transición energética (Ministerio del Medio Ambiente, 2026).

En consecuencia, la experiencia chilena muestra que el cierre de una central a carbón no constituye únicamente el término de una fuente de generación eléctrica, sino un proceso con implicancias laborales, económicas, ambientales y sociales que requieren medidas de transición y seguimiento posteriores al cese de operaciones.

7.3.2. Reconversión de centrales térmicas

La reconversión de centrales térmicas consiste en adaptar una instalación existente para modificar su forma de generación o incorporar nuevas fuentes de energía, aprovechando parte de la infraestructura ya disponible. Dependiendo de la tecnología utilizada, este proceso puede implicar la sustitución total o parcial del carbón, modificaciones en el sistema de combustible o en la fuente de calor, manteniendo otros componentes de la central, como parte del ciclo de generación, la conexión al sistema eléctrico o la infraestructura del emplazamiento.

Desde el punto de vista ambiental, la reconversión puede contribuir a disminuir emisiones asociadas a la combustión de carbón. Sin embargo, su impacto depende directamente de la tecnología utilizada. Larraín y Melej (2023) advierten que alternativas como la biomasa, el gas natural o la co-combustión con amoníaco no necesariamente representan soluciones plenamente limpias, ya que pueden mantener emisiones, generar nuevos impactos ambientales o extender la operación de infraestructura fósil.

En términos sociales y económicos, la reconversión puede reducir algunos

efectos negativos del cierre definitivo, al mantener actividad productiva, empleo técnico y uso de infraestructura existente. Esto resulta relevante en comunas donde las centrales han tenido un rol importante en la economía local. No obstante, también exige procesos de capacitación y reconversión laboral, ya que las nuevas tecnologías requieren competencias distintas a las asociadas a la generación termoeléctrica tradicional.

Desde una perspectiva energética, la reconversión puede aportar flexibilidad al sistema eléctrico si se orienta hacia tecnologías compatibles con una matriz renovable, como almacenamiento energético u otras soluciones de respaldo. Por ello, esta alternativa no debe evaluarse solo como una forma de evitar el cierre, sino como una opción que puede contribuir a la seguridad del suministro y a la integración de energías renovables, siempre que la tecnología seleccionada sea coherente con los objetivos de descarbonización.

En consecuencia, la reconversión de centrales térmicas constituye una alternativa al cierre definitivo que permite adaptar total o parcialmente una instalación existente a nuevas condiciones de generación. Su conveniencia depende de la tecnología seleccionada y de la evaluación conjunta de sus efectos ambientales, sociales, económicos.

7.3.3. Tecnologías y experiencias de reconversión

La reconversión de centrales térmicas ha adquirido creciente relevancia como una alternativa para apoyar los procesos de descarbonización, permitiendo reutilizar infraestructura existente y reducir parte de los impactos asociados al cierre definitivo. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024), el desarrollo de sistemas de almacenamiento energético constituye uno de los principales habilitadores para la integración masiva de energías renovables variables, debido a su capacidad para gestionar excedentes de generación y aportar flexibilidad a los sistemas eléctricos.

Entre las tecnologías con potencial de aplicación en procesos de reconversión destacan los sistemas de almacenamiento térmico, los cuales permiten almacenar energía en forma de calor para posteriormente transformarla nuevamente en electricidad. Dentro de estas alternativas se encuentran las sales fundidas y las baterías de Carnot, tecnologías que han despertado interés debido a su capacidad para reutilizar parte de la infraestructura presente en centrales termoeléctricas convencionales y contribuir a la integración de energías renovables en la red eléctrica (IRENA, 2020).

Otra posibilidad corresponde a la incorporación de combustibles alternativos al carbón. Entre las opciones consideradas para la reconversión de centrales termoeléctricas se encuentran el gas natural, la biomasa, el hidrógeno y sus derivados, como el amoníaco. Estas alternativas pueden sustituir total o parcialmente el carbón, dependiendo de la tecnología implementada y de las modificaciones realizadas en la central. En particular, el hidrógeno verde y sus derivados han adquirido relevancia por su potencial para contribuir a la reducción de emisiones en sectores de difícil descarbonización (Larraín & Melej, 2023; IRENA, 2022).

A nivel internacional, las experiencias de reconversión muestran que las centrales térmicas pueden adaptarse mediante cambios en los combustibles utilizados, la incorporación de sistemas de almacenamiento u otras modificaciones tecnológicas que permitan aprovechar parte de su infraestructura existente. En este contexto, la selección de una tecnología de reconversión depende de factores técnicos, económicos, sociales y ambientales, los cuales deben evaluarse de manera integral para determinar su conveniencia frente a otras alternativas de descarbonización.

7.4. Evaluación multicriterio para la toma de decisiones

7.4.1. Evaluación integral de proyectos energéticos

La evaluación de proyectos y sistemas energéticos requiere considerar distintas dimensiones asociadas a su sostenibilidad. En este sentido, la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), junto con organismos como Naciones Unidas y la Agencia Internacional de Energía (IEA), desarrolló los *Energy Indicators for Sustainable Development* (EISD), conformados por 30 indicadores agrupados en tres dimensiones principales: económica, social y ambiental. Estos indicadores buscan apoyar el análisis de los sistemas energéticos y sus efectos sobre el desarrollo sostenible (IAEA et al., 2005).

De manera complementaria, Wang et al. (2009) señalan que la evaluación de sistemas energéticos sostenibles considera criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, debido al carácter multidimensional de las decisiones asociadas al sector energético. Por esta razón, la incorporación conjunta de estas dimensiones permite establecer una base de evaluación más amplia para apoyar procesos de toma de decisiones en proyectos y sistemas energéticos.

La evaluación de múltiples criterios resulta relevante porque las decisiones energéticas no dependen de una sola variable, sino de distintos factores que pueden tener niveles de importancia diferentes. Pohekar y Ramachandran (2004) señalan que los problemas de planificación energética suelen involucrar objetivos económicos, ambientales, sociales y técnicos de manera simultánea. Por ello, considerar estos criterios en conjunto permite comparar alternativas de forma más completa y entregar una base más estructurada para apoyar la toma de decisiones.

7.4.2. Análisis multicriterio (MCDA)

El Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (*Multi-Criteria Decision*

Analysis, MCDA) corresponde a un conjunto de métodos que permiten comparar distintas alternativas cuando una decisión depende de varios criterios al mismo tiempo. Su objetivo es ordenar y estructurar la información disponible para apoyar el proceso de decisión, considerando la importancia que puede tener cada criterio dentro del análisis (Wang et al., 2009).

En términos generales, una evaluación multicriterio comienza con la definición del problema y de las alternativas disponibles. Posteriormente, se establecen los criterios que serán utilizados para evaluarlas, se determina la importancia relativa de cada uno y se analiza el desempeño de las alternativas frente a estos criterios. A partir de este proceso es posible establecer una priorización que facilite la comparación entre las opciones disponibles. Existen diferentes métodos para realizar este tipo de análisis, entre ellos AHP, ELECTRE, PROMETHEE y TOPSIS (Pohekar & Ramachandran, 2004; Wang et al., 2009).

7.4.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Dentro de los métodos de análisis multicriterio, el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP), desarrollado por Thomas Saaty, constituye una metodología orientada a apoyar la toma de decisiones cuando intervienen múltiples criterios. El método permite estructurar un problema de decisión de manera jerárquica, facilitando el análisis de los distintos elementos involucrados y su posterior integración para establecer una prioridad entre las alternativas disponibles (Saaty, 1980).

La estructura general del AHP considera un objetivo principal, los criterios relevantes para la decisión y las alternativas que serán evaluadas. A partir de esta organización, el método permite establecer la importancia relativa de los elementos considerados mediante comparaciones por pares, es decir, evaluando dos elementos a la vez respecto de un objetivo común (Saaty, 1980).

Para expresar estas comparaciones, Saaty propone una escala fundamental de valores entre 1 y 9. El valor 1 representa igual importancia o preferencia entre dos elementos, mientras que los valores 3, 5, 7 y 9 representan niveles progresivamente mayores. Los valores 2, 4, 6 y 8 corresponden a situaciones intermedias entre los juicios principales. Asimismo, las comparaciones presentan una relación recíproca, de modo que la preferencia de un elemento respecto de otro determina inversamente la relación contraria (Saaty, 1980). A continuación, en la Tabla 3 se presenta la escala fundamental de Saaty utilizada en este estudio.

Tabla 3. Escala fundamental de Saaty para comparaciones por pares.

Valor	Interpretación
1	Igual importancia
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro
9	Importancia extrema de un elemento sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

Fuente: Elaboración propia.

Las comparaciones realizadas se organizan mediante matrices de comparación por pares, a partir de las cuales el método permite obtener prioridades relativas para los elementos evaluados. Estas prioridades permiten representar la importancia de los distintos criterios considerados y, posteriormente, integrar la evaluación de las alternativas para establecer un orden de preferencia dentro del problema de decisión (Saaty, 1980).

Debido a que las comparaciones realizadas pueden presentar contradicciones, el AHP incorpora mecanismos para evaluar la consistencia de los juicios. Para ello se utiliza la Razón de Consistencia (*Consistency Ratio*, CR), indicador que permite determinar si las comparaciones presentan un nivel de coherencia aceptable. De acuerdo con Saaty (1980), valores de CR iguales o inferiores a 0,10 son considerados

generalmente aceptables.

El AHP presenta una amplia aplicación en problemas relacionados con el sector energético. Pohekar y Ramachandran (2004), en una revisión de métodos multicriterio aplicados a la planificación energética sostenible, identifican al AHP como una de las metodologías ampliamente utilizadas en este ámbito, incluyendo aplicaciones relacionadas con selección de tecnologías, planificación y evaluación de proyectos energéticos.

En el contexto de la transición de centrales termoeléctricas, Lugo et al. (2025) utilizan AHP para determinar la importancia relativa de criterios considerados en la evaluación de distintas alternativas para centrales a carbón, incorporando aspectos ambientales, técnicos, económicos y sociales. Posteriormente, los autores complementan el análisis mediante PROMETHEE para establecer la priorización de las alternativas, constituyendo un antecedente de la utilización de herramientas multicriterio en decisiones asociadas al cierre y reconversión de centrales termoeléctricas.

En Chile también existen antecedentes de aplicación del AHP en el sector energético. El Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023), en un estudio desarrollado para el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, aborda metodologías de evaluación social para proyectos asociados a la industria del hidrógeno verde, incorporando AHP como herramienta de análisis multicriterio. Este antecedente evidencia su aplicación en proyectos vinculados con la transición energética dentro del contexto nacional.

Entre las principales ventajas del AHP se encuentran su capacidad para estructurar problemas complejos, integrar criterios de distinta naturaleza y evaluar la consistencia de las comparaciones realizadas. No obstante, también presenta limitaciones relacionadas con la subjetividad inherente a los juicios de comparación

y con el aumento del número de comparaciones necesarias a medida que se incrementa la cantidad de elementos considerados (Saaty, 1980; Pohekar & Ramachandran, 2004).

8. METODOLOGÍA

8.1. Diseño de la investigación y caso de estudio

La investigación se desarrolla mediante un análisis comparativo de dos alternativas para una central termoeléctrica a carbón: el cierre definitivo y la reconversión. La evaluación considera un conjunto de criterios asociados a los principales aspectos económicos, sociales y ambientales involucrados en ambas alternativas, los cuales permiten estructurar posteriormente su comparación mediante una metodología multicriterio.

Para desarrollar el estudio se utiliza información secundaria proveniente de literatura científica, organismos públicos, estudios técnicos y antecedentes publicados por empresas del sector energético. Estas fuentes constituyen la base para la definición de los criterios de evaluación y para la posterior aplicación del método AHP.

Para definir el caso de estudio se consideran inicialmente las centrales termoeléctricas Guacolda, ubicada en Huasco, y Santa María, ubicada en Coronel. Ambas corresponden a instalaciones de capacidad relevante que permanecen dentro del proceso de descarbonización y cuyo retiro o reconversión forma parte de las decisiones pendientes del sistema eléctrico chileno. El Plan de Descarbonización identifica a Santa María con una capacidad de 370 MW y establece su retiro o reconversión antes de 2040. En el caso de Guacolda, sus cinco unidades suman aproximadamente 763 MW y se contempla una trayectoria de reconversión mediante co-combustión con amoníaco (Ministerio de Energía, 2025).

Entre ambas centrales se selecciona Guacolda como caso de estudio, principalmente por la mayor disponibilidad de antecedentes asociados a una alternativa concreta de reconversión. El Plan de Descarbonización contempla para sus unidades 1 y 2 una reconversión con 30 % de amoníaco hacia 2030 y con 50 %

hacia 2033, mientras que para las unidades restantes considera una reconversión con 50 % de amoníaco hacia 2033 (Ministerio de Energía, 2025). La Figura 7 presenta una vista general de la Central Termoeléctrica Guacolda, ubicada en Huasco.



Figura 7. Central Termoeléctrica Guacolda, Huasco. [Fuente: Guacolda Energía SpA]

Asimismo, Guacolda Energía dispone de antecedentes técnicos y una hoja de ruta asociada al desarrollo de este proyecto. En contraste, Colbún señala que para la Central Santa María se han estudiado alternativas de reconversión hacia otros combustibles, como gas natural, sin existir aún una decisión definida al respecto (Colbún, 2025). Por esta razón, Guacolda presenta mayores antecedentes asociados al desarrollo de una alternativa de reconversión, permitiendo disponer de una base documental más amplia para la construcción y evaluación de los escenarios considerados en esta investigación.

A partir de esta alternativa, la reconversión no implica el reemplazo completo de la central, sino la adaptación de parte de su infraestructura para permitir la co-

combustión con amoníaco. En términos físicos, las principales modificaciones se concentran en los sistemas de combustión y abastecimiento de combustible, mediante la incorporación de quemadores compatibles con amoníaco y de instalaciones para su recepción, almacenamiento, regasificación y conducción hacia la caldera. De este modo, una parte importante de los equipos existentes, como la turbina de vapor y otros sistemas asociados al proceso de generación, puede continuar siendo utilizada. La Figura 8 presenta de manera esquemática las principales modificaciones requeridas para este tipo de reconversión.

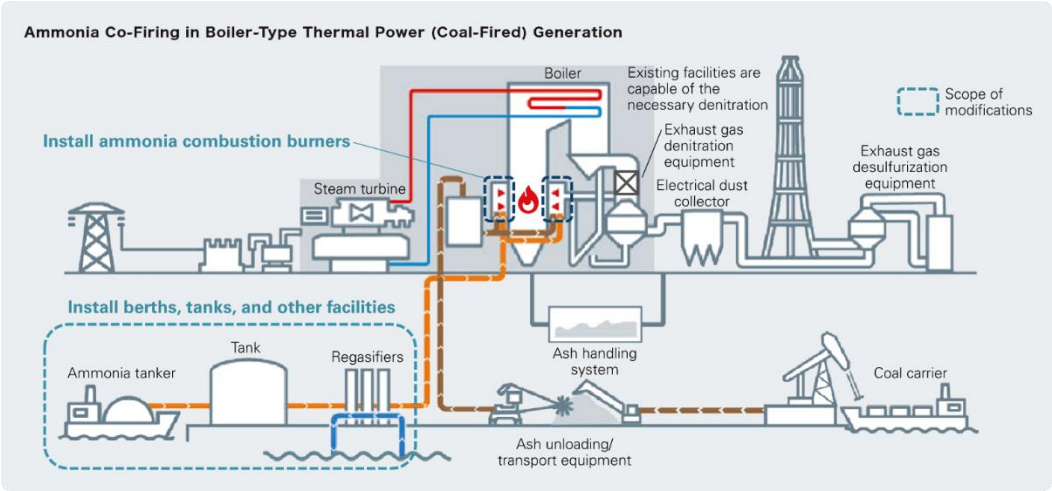


Figura 8. Esquema de adaptación de una central termoeléctrica a carbón para co-combustión con amoníaco [Fuente: JERA (2022)].

La selección de Guacolda permite trabajar con una alternativa de reconversión técnicamente definida y respaldada por antecedentes disponibles, facilitando la comparación con el escenario de cierre definitivo. A partir de este caso de estudio, en los apartados siguientes se establecen los criterios de evaluación y la estructura metodológica utilizada para comparar ambas alternativas.

8.2. Definición de alternativas

Para realizar la evaluación comparativa se definen dos alternativas principales para el futuro de la Central Termoeléctrica Guacolda: el cierre definitivo de la central y su reconversión completa mediante el uso de amoníaco verde. Ambas alternativas constituyen los escenarios finales considerados para su posterior evaluación mediante los criterios definidos en la investigación.

La primera alternativa corresponde al cierre definitivo de Guacolda, entendido como el cese permanente de la generación eléctrica de sus cinco unidades. Para efectos de esta investigación, este escenario considera el término de la operación de la central y los efectos asociados a dicho proceso, sin incorporar una tecnología específica de reemplazo ni la construcción de una nueva instalación.

La segunda alternativa corresponde a la reconversión de la Central Guacolda mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. Esta configuración forma parte de la trayectoria de reconversión considerada para la central, la cual contempla la incorporación progresiva de amoníaco verde con el propósito de reducir las emisiones de CO_2 asociadas a la generación eléctrica. De acuerdo con los antecedentes disponibles, se contempla alcanzar una participación de 50 % de amoníaco verde en las cinco unidades hacia 2033 (Ministerio de Energía, 2025; Guacolda Energía, 2024).

Para efectos de esta investigación, la reconversión se entiende como un proceso de transición orientado a disminuir las emisiones de CO_2 de la central, sin que ello implique necesariamente la sustitución total e inmediata del carbón. En este sentido, la configuración de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón constituye un escenario válido para representar la alternativa de reconversión, dado que permite evaluar una etapa concreta del proceso de descarbonización y, al mismo tiempo,

mantener la operación de la central. De esta forma, la comparación se realiza entre el cierre definitivo y una alternativa de reconversión respaldada por la trayectoria establecida para Guacolda.

8.3. Criterios de evaluación

Para realizar la comparación entre las alternativas se establece un conjunto de criterios de evaluación a partir de la revisión de literatura científica, estudios técnicos y antecedentes relacionados con el cierre y reconversión de centrales termoeléctricas y los procesos de transición energética. Su selección busca incorporar los principales aspectos involucrados en la decisión, considerando tanto los efectos asociados al cierre de la central como aquellos derivados de su reconversión.

Con el propósito de organizar los criterios considerados, estos se agrupan conceptualmente en tres dimensiones: económica, social y ambiental. Esta clasificación responde al enfoque ampliamente utilizado en la evaluación de sostenibilidad de sistemas y proyectos energéticos, donde estas dimensiones permiten abordar de manera integral los distintos efectos asociados a las decisiones del sector energético (Wang et al., 2009; International Atomic Energy Agency [IAEA], 2005).

Esta agrupación tiene únicamente un propósito conceptual y organizativo, por lo que no se asigna una ponderación previa a cada dimensión. Los criterios son evaluados directamente entre sí mediante el método AHP, independientemente de la dimensión a la que pertenezcan. De esta manera, se evita que la importancia de cada criterio quede condicionada por una ponderación previamente establecida para las dimensiones económica, social o ambiental, permitiendo que su peso relativo resulte directamente de las comparaciones realizadas entre los criterios.

La selección de los criterios se realiza en función de su relevancia para el caso de estudio, su capacidad para establecer diferencias entre ambas alternativas y la

disponibilidad de información que permita respaldar su evaluación. Asimismo, se procura evitar la incorporación de criterios que aborden aspectos similares, con el propósito de reducir posibles superposiciones en el análisis. De esta manera, el número de criterios responde a la identificación de los principales elementos necesarios para desarrollar una comparación clara y representativa entre el cierre y la reconversión de la central.

Criterio 1. Inversión requerida

El criterio inversión requerida evalúa los recursos económicos necesarios para implementar cada una de las alternativas consideradas. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría económica, dado que se relaciona directamente con los recursos financieros requeridos para materializar cada alternativa. Su incorporación responde a que las decisiones de cierre o reconversión de centrales termoeléctricas implican requerimientos de capital diferentes, por lo que la inversión constituye un elemento relevante al analizar la factibilidad económica de estas alternativas. En estudios multicriterio aplicados específicamente a la transición de centrales a carbón, Lugo et al. (2025) incorporan los costos de inversión dentro de los factores económicos utilizados para comparar distintas opciones de transformación de estas instalaciones.

Para efectos de esta investigación, en la alternativa de cierre se consideran los recursos necesarios para materializar el término definitivo de la operación y las acciones asociadas a dicho proceso. En la reconversión, el criterio comprende las inversiones necesarias para adaptar las unidades existentes e incorporar la infraestructura y tecnología requerida para la co-combustión con amoníaco verde. De esta manera, el criterio permite comparar el esfuerzo económico inicial requerido para implementar cada alternativa.

Criterio 2. Sostenibilidad económica de la alternativa

El criterio sostenibilidad económica de la alternativa (C2) evalúa las condiciones económicas que enfrenta cada alternativa una vez implementada, considerando tanto los costos que se mantienen en el tiempo como la posibilidad de generar ingresos y valor económico durante su desarrollo posterior. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría económica, dado que se centra en las consecuencias financieras de largo plazo asociadas a cada alternativa. Su incorporación permite complementar la inversión requerida (C1), diferenciando el desembolso inicial de los efectos económicos que se producen posteriormente.

En la alternativa de cierre, el término de la operación permite eliminar o reducir costos recurrentes asociados al abastecimiento de combustible, operación y mantenimiento de la central. Sin embargo, al cesar definitivamente la actividad productiva, también desaparecen los ingresos recurrentes asociados a su funcionamiento. En contraste, la reconversión implica mantener costos vinculados a la operación, mantenimiento y suministro de combustibles, además de considerar la disponibilidad y confiabilidad de los insumos necesarios para sostener su funcionamiento en el tiempo, aspecto relacionado con la seguridad energética. No obstante, la continuidad de la actividad permite mantener una fuente de ingresos y, bajo condiciones económicas favorables, posibilita la recuperación progresiva de la inversión realizada y la generación de retornos económicos en el largo plazo.

Criterio 3. Infraestructura, desmantelamiento y reutilización

El criterio infraestructura, desmantelamiento y reutilización (C3) evalúa las implicancias asociadas al destino y aprovechamiento de la infraestructura existente de la central bajo cada alternativa. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría económica, dado que su análisis se relaciona principalmente con el uso,

adaptación y gestión de los activos e instalaciones existentes. Su incorporación resulta relevante debido a que el cierre y la reconversión plantean tratamientos distintos para la infraestructura instalada. En este sentido, el Banco Mundial (2021) señala que los procesos de retiro de centrales a carbón pueden involucrar actividades de desmantelamiento, remediación y gestión de los activos existentes, mientras que su reconversión puede permitir el aprovechamiento de parte de la infraestructura disponible, reduciendo la necesidad de desarrollar instalaciones completamente nuevas.

Para efectos de esta investigación, en la alternativa de cierre se consideran los requerimientos asociados al desmantelamiento, gestión y eventual reutilización de la infraestructura que deja de cumplir su función original. En la reconversión, se evalúa la posibilidad de adaptar y reutilizar los activos existentes para integrarlos a una nueva configuración tecnológica. De esta manera, el criterio permite comparar el grado de aprovechamiento, intervención y reutilización de la infraestructura instalada bajo ambas alternativas.

Criterio 4. Impacto socioeconómico local

El criterio impacto socioeconómico local (C4) evalúa las consecuencias de cada alternativa sobre el empleo directo e indirecto y sobre la actividad económica vinculada a la central. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría social, debido a que su foco principal se encuentra en los efectos que las alternativas pueden generar sobre los trabajadores, las comunidades y el entorno territorial. Si bien también incorpora consecuencias económicas, estas se analizan desde su impacto sobre el territorio y la población local, por lo que, para efectos de simplificar la clasificación, se incorpora únicamente dentro de la categoría social.

Su incorporación se sustenta en que los efectos de la transición desde el carbón

pueden concentrarse territorialmente, afectando tanto a los trabajadores como a las comunidades y actividades económicas relacionadas con estas instalaciones. La IEA (2024) señala que, aunque la transición energética puede generar crecimiento neto del empleo a nivel agregado, sus consecuencias sobre puestos de trabajo y medios de vida varían considerablemente entre localidades, adquiriendo especial relevancia en los territorios vinculados al carbón.

Para ambas alternativas se consideran los cambios relacionados con la continuidad, pérdida o generación de empleo, junto con sus efectos sobre proveedores, servicios y otras actividades económicas relacionadas con Guacolda. De esta manera, el criterio permite analizar de forma conjunta las principales consecuencias económicas y laborales que cada alternativa puede generar en el territorio.

Criterio 5. Reconversión laboral

El criterio reconversión laboral evalúa las condiciones que presenta cada alternativa para facilitar la adaptación de los trabajadores frente al proceso de transición. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría social, dado que su análisis se centra en las consecuencias laborales que enfrentan las personas vinculadas a la central y en sus posibilidades de adaptación frente a los cambios generados por cada alternativa.

Este aspecto adquiere relevancia debido a que los trabajadores asociados al carbón pueden enfrentar dificultades para trasladar sus competencias hacia nuevas actividades. La IEA (2024) identifica el desarrollo de habilidades y los programas de capacitación como herramientas relevantes para facilitar la incorporación de trabajadores provenientes de sectores fósiles hacia nuevas oportunidades laborales.

El criterio considera las necesidades de capacitación y adquisición de nuevas

competencias, así como las posibilidades de reubicación o continuidad laboral asociadas a cada alternativa. A diferencia del impacto socioeconómico local, su evaluación se concentra específicamente en las condiciones de adaptación de los trabajadores frente a los cambios generados por el cierre o la reconversión de la central.

Criterio 6. Emisión de gases de efecto invernadero (GEI)

El criterio emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evalúa las emisiones asociadas a cada alternativa y su contribución al proceso de descarbonización de la central. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría ambiental, dado que analiza directamente los efectos de cada alternativa sobre las emisiones responsables del cambio climático.

Su incorporación resulta especialmente relevante debido a que la reducción de emisiones de CO_2 constituye uno de los principales fundamentos para la sustitución parcial del carbón mediante amoníaco. En este sentido, Wang et al. (2024) señalan que la co-combustión de carbón con amoníaco verde constituye una alternativa para reducir las emisiones de CO_2 de centrales termoeléctricas mediante el reemplazo parcial del combustible fósil. Asimismo, Sun et al. (2025) identifican la co-combustión con amoníaco como una tecnología factible para disminuir las emisiones de carbono en calderas que actualmente utilizan carbón.

Para efectos de esta investigación, el criterio permite comparar las emisiones asociadas al cierre definitivo de la central con aquellas correspondientes al escenario de reconversión mediante 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. En este último caso, se consideran los antecedentes disponibles respecto de la reducción de emisiones derivada de la sustitución parcial del carbón y, cuando la información disponible lo permita, aquellas asociadas a la producción y suministro del amoníaco.

Criterio 7. Calidad ambiental y efectos sobre la salud

El criterio calidad del aire e impacto en la salud, evalúa los efectos que cada alternativa puede generar sobre la calidad del aire local y, consecuentemente, sobre la salud de la población expuesta. Este criterio se agrupa conceptualmente dentro de la categoría ambiental, debido a que su análisis se relaciona principalmente con la presencia de contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre el entorno. No obstante, presenta también una dimensión social asociada a las consecuencias que una menor o mayor exposición puede generar sobre la salud de las personas. Para efectos de simplificar la clasificación, se incorpora únicamente dentro de la categoría ambiental.

Su incorporación permite considerar impactos locales distintos de las emisiones de gases de efecto invernadero analizadas en el criterio anterior. La generación termoeléctrica puede producir contaminantes como material particulado, óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx), cuya presencia afecta la calidad del aire y puede generar consecuencias sobre la salud de la población.

Para efectos de esta investigación, el criterio considera los cambios esperados en los principales contaminantes atmosféricos locales y sus potenciales implicancias sobre la calidad del aire y la salud de la población. De esta manera, permite comparar los efectos asociados al cese de las emisiones producto del cierre definitivo con aquellos derivados de la continuidad de la operación bajo el escenario de reconversión.

A continuación, en la Tabla 4 se presenta un resumen de los siete criterios de evaluación descritos anteriormente.

Tabla 4. Resumen de los criterios de evaluación considerados para el análisis multicriterio.

Categoría	N°	Criterio	Descripción
Económica	1	Inversión requerida	Recursos económicos iniciales necesarios para implementar cada alternativa.
Económica	2	Sostenibilidad económica de la alternativa	Condiciones económicas de largo plazo, considerando costos recurrentes, generación de ingresos y condiciones necesarias para sostener la operación.
Económica	3	Infraestructura, desmantelamiento y reutilización	Destino, intervención, desmantelamiento y posibilidades de reutilización de la infraestructura existente.
Social	4	Impacto socioeconómico local	Efectos sobre el empleo, la actividad económica y el entorno territorial vinculado a la central.
Social	5	Reconversión laboral	Condiciones para la adaptación, capacitación, reubicación y continuidad laboral de los trabajadores.
Ambiental	6	Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)	Emisiones asociadas a cada alternativa y su contribución al proceso de descarbonización.
Ambiental	7	Calidad ambiental y efectos sobre la salud	Efectos sobre la calidad ambiental local y sus potenciales consecuencias sobre la salud de la población.

Fuente: Elaboración propia.

8.4. Aplicación del método AHP

A partir de los criterios definidos previamente, se aplica el método AHP con el propósito de estructurar la comparación entre las alternativas consideradas para la Central Termoeléctrica Guacolda. El procedimiento se desarrolla en dos etapas principales. En primer lugar, se determina la importancia relativa de los criterios mediante comparaciones por pares. Posteriormente, las alternativas se evalúan respecto de cada criterio, permitiendo obtener una prioridad global para cada una.

8.4.1. Determinación de las ponderaciones de los criterios

La aplicación del método AHP comienza con la estructuración jerárquica del problema de decisión. Esta estructura permite organizar los distintos elementos que participan en la evaluación y establecer la relación existente entre el objetivo general, los criterios de análisis y las alternativas consideradas.

En el nivel superior de la jerarquía se encuentra el objetivo de la evaluación, correspondiente a comparar las alternativas consideradas para la Central Termoeléctrica Guacolda. En el segundo nivel se incorporan los criterios definidos previamente para realizar la comparación y, finalmente, en el nivel inferior se ubican las dos alternativas de análisis: el cierre definitivo de la central y su reconversión mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. La estructura jerárquica utilizada para la aplicación del método se presenta en la Figura 9.

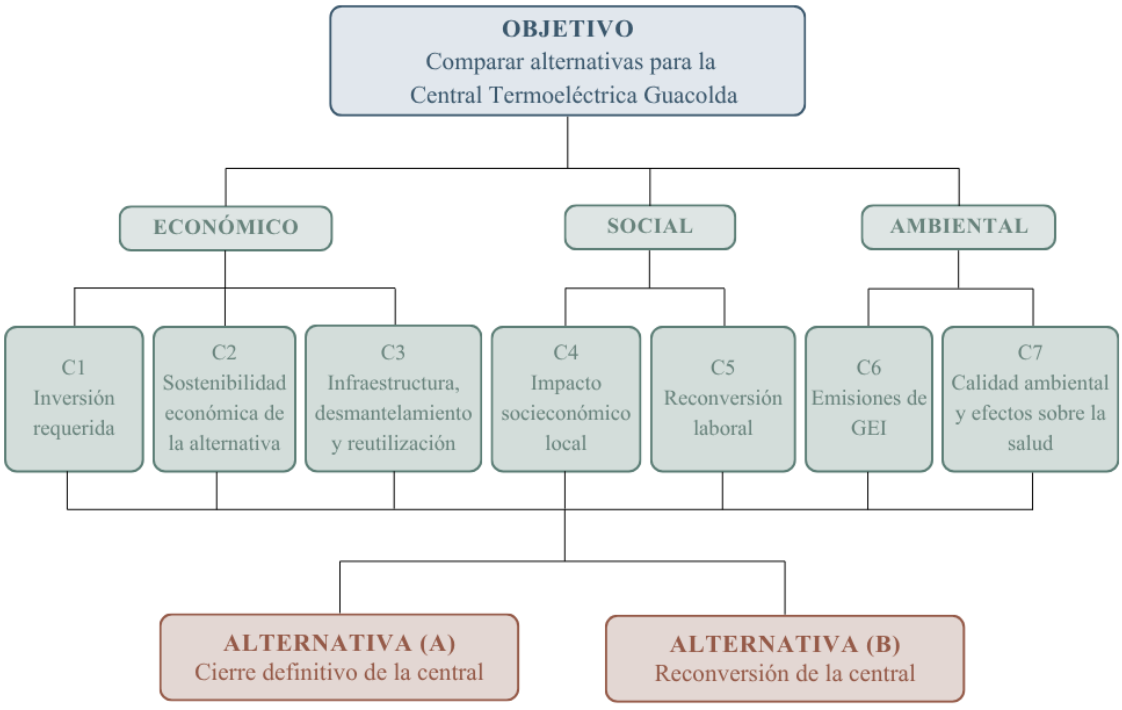


Figura 9. Estructura jerárquica del modelo AHP aplicado a la Central Termoeléctrica Guacolda. [Fuente: Elaboración propia].

Una vez definida la estructura jerárquica, se procede a determinar la importancia relativa de los criterios. Para ello, el método AHP utiliza comparaciones por pares, de manera que cada criterio se compara directamente con cada uno de los demás criterios considerados en la evaluación.

Sea n el número total de criterios. Cada criterio se representa mediante C_i o C_j, donde los subíndices i y j indican su posición dentro del conjunto de criterios $i, j = 1,2, \dots, n$.

En la comparación por pares, el índice i identifica el criterio ubicado en una determinada fila, mientras que el índice j identifica el criterio ubicado en una determinada columna. El resultado de cada comparación se representa mediante el elemento a_{ij}, el cual expresa la importancia relativa del criterio C_i respecto del criterio C_j.

Los valores a_{ij} se asignan utilizando la escala fundamental de Saaty presentada previamente en la Tabla 3. De esta manera, cuando ambos criterios presentan igual importancia relativa se asigna el valor 1, mientras que valores mayores representan una importancia creciente del criterio ubicado en la fila respecto del criterio ubicado en la columna. Cuando ocurre la relación inversa, se utiliza el valor recíproco correspondiente a $\frac{1}{a_{ij}}$.

Por lo tanto, los elementos de comparación cumplen las siguientes condiciones: $a_{ii} = 1$, debido a que cada criterio presenta igual importancia respecto de sí mismo.

A partir de estas relaciones se construye la tabla de comparación por pares de los criterios, como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Estructura general de una matriz de comparación por pares del método AHP.

Criterio	C_1	C_2	$\cdots$	C_n
C_1	1	a_{12}	$\cdots$	a_{1n}
C_2	a_{21}	1	$\cdots$	a_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
C_n	a_{n1}	a_{n2}	$\cdots$	1

Fuente: Elaboración propia.

Los valores incorporados en la tabla se determinan a partir del análisis de antecedentes bibliográficos y documentales relacionados con el problema de decisión. A partir de esta información se establece la importancia relativa entre cada par de criterios y se asigna el valor correspondiente de acuerdo con la escala de Saaty.

La información contenida en la tabla puede expresarse matemáticamente mediante una matriz cuadrada de comparación por pares, denominada $\mathrm{A} = [a_{ij}]$ o, de manera desarrollada, según la Ecuación 1:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

La matriz A presenta una dimensión $n \times n$, debido a que contiene una fila y una columna para cada uno de los criterios considerados. Cada elemento a_{ij} conserva la interpretación definida anteriormente: representa la importancia relativa del criterio situado en la fila $i$respecto del criterio situado en la columna j.

Una vez construida la matriz de comparación, se procede a normalizar sus valores con el propósito de obtener una medida comparable de la importancia relativa de cada criterio.

Como primer paso, se calcula la suma de los elementos contenidos en cada columna, donde S_j representa la suma total de los valores de la columna j. De esta

forma, se obtiene un valor de suma para cada una de las n columnas de la matriz, según la Ecuación 2:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \, . \tag{2}$$

Posteriormente, cada elemento a_{ij} se divide por la suma de la columna a la cual pertenece. El elemento normalizado se representa mediante $\bar{a}_{ij}$, como se plantea en la Ecuación 3:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} . \tag{3}$$

Este procedimiento se realiza para todos los elementos de la matriz, generando la matriz normalizada A como se observa en la Ecuación 4:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \cdots & \bar{a}_{1n} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \cdots & \bar{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{a}_{n1} & \bar{a}_{n2} & \cdots & \bar{a}_{nn} \end{pmatrix} . \tag{4}$$

Luego de la normalización, la suma de los elementos de cada columna de A es igual a 1. De esta manera, los valores contenidos en la matriz pueden ser comparados utilizando una misma escala relativa.

A partir de la matriz normalizada se calcula la ponderación correspondiente a cada criterio. Para ello, se obtiene el promedio de los elementos contenidos en cada fila. La ponderación del criterio C_i se representa mediante p_i para cada una de las n filas, y se calcula mediante la Ecuación 5:

$$p_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \bar{a}_{ij} \, . \tag{5}$$

Luego, estos valores se organizan en el vector de ponderaciones de los criterios, representado en la Ecuación 6:

$$P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Cada elemento p_i representa el peso relativo asignado al criterio C_i dentro del problema de decisión. En conjunto, las ponderaciones cumplen la condición dada por la Ecuación 7:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i \ = 1 \, . \tag{7}$$

Por esta razón, los valores del vector también pueden expresarse en términos porcentuales, multiplicando cada ponderación por 100. El vector P permite así identificar la importancia relativa de cada criterio y constituye posteriormente uno de los componentes utilizados para obtener la prioridad global de las alternativas.

Una vez obtenidas las ponderaciones de los criterios, se verifica la consistencia de las comparaciones realizadas. Este procedimiento permite determinar si los valores asignados en la matriz de comparación por pares mantienen un nivel de coherencia adecuado entre sí. Esta verificación resulta necesaria debido a que los juicios establecidos entre los criterios pueden presentar inconsistencias, aun cuando cada comparación individual se encuentre debidamente fundamentada.

Para evaluar esta consistencia, el método AHP utiliza la Razón de Consistencia (*Consistency Ratio*, CR). Su cálculo requiere determinar previamente el valor propio máximo de la matriz de comparación, representado por $\lambda_{\max}$.

Para obtener este valor, en primer lugar, se multiplica la matriz original de comparación por pares A por el vector de ponderaciones P obtenido anteriormente. Como resultado de esta operación se obtiene un nuevo vector, denominado Q, obtenido mediante la Ecuación 8:

$$A \cdot P = Q \ . \tag{8}$$

De manera desarrollada, esta operación se expresa de acuerdo con la Ecuación 9:

$$\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} . \tag{9}$$

El vector Q corresponde a un resultado intermedio utilizado para verificar la consistencia de la matriz de comparación. Cada uno de sus elementos q_i se obtiene al multiplicar los valores de la fila i de la matriz A por las ponderaciones correspondientes del vector P y sumar los resultados obtenidos, como se presenta en la Ecuación 10:

$$q_i = \sum_{j=1}^{n} \left(a_{ij} \cdot p_j\right) . \tag{10}$$

A partir de los valores obtenidos en el vector Q, cada elemento q_i se divide por la ponderación p_i correspondiente al mismo criterio. De esta manera, se obtiene un valor λ_i para cada uno de los criterios, según la Ecuación 11:

$$\lambda_i = \frac{q_i}{p_i} . \tag{11}$$

Donde λ_i corresponde al valor obtenido para el criterio C_i a partir de la relación entre el elemento q_i y su respectiva ponderación p_i. Este procedimiento se realiza para cada uno de los n criterios considerados.

La relación entre los criterios, sus ponderaciones y los valores utilizados para determinar $\lambda_{\max}$ se resume en la Tabla 6.

Tabla 6. Estructura de los valores utilizados para el cálculo de λ_{max}.

Criterio	Ponderación	Q	λ_i
C_1	p_1	q_1	λ_1
C_2	p_2	q_2	λ_2
⋮	⋮	⋮	⋮
C_n	p_n	q_n	λ_n

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores λ_i obtenidos para cada criterio, se calcula su promedio para determinar $\lambda_{\max}$, como se presenta en la Ecuación 12:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \ , \tag{12}$$

Donde n corresponde al número total de criterios incluidos en la matriz de comparación. El valor de $\lambda_{\max}$ permite evaluar el grado de consistencia existente entre las comparaciones realizadas. En una matriz perfectamente consistente, este valor coincide con n ; por lo tanto, mientras mayor sea la diferencia entre $\lambda_{\max}$ y n, mayor será el nivel de inconsistencia presente en las comparaciones.

Una vez determinado $\lambda_{\max}$, se calcula el Índice de Consistencia (*Consistency Index*, CI), mediante la Ecuación 13:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} . \tag{13}$$

Para determinar la Razón de Consistencia, el valor de CI se compara con el Índice Aleatorio (*Random Index*, RI). Este índice corresponde a un valor de referencia obtenido a partir de matrices de comparación recíprocas generadas aleatoriamente y depende del número de elementos $n$considerados en la matriz. Por lo tanto, el valor de RI utilizado se selecciona de acuerdo con el número de criterios incluidos en la evaluación (Saaty, 1980). Los valores de referencia establecidos para la aplicación del método AHP se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores del Índice Aleatorio (RI) según el tamaño de la matriz.

Número de criterios (n)	Índice Aleatorio (RI)
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fuente: Elaboración propia.

A partir del CI y del RI correspondiente al número de criterios evaluados, se calcula finalmente la Razón de Consistencia (*Consistency Ratio*, CR), como se presenta en la Ecuación 14:

$$CR = \frac{CI}{RI}. \tag{14}$$

La Razón de Consistencia permite determinar si el nivel de inconsistencia presente en las comparaciones es aceptable. Para ello, Saaty establece como referencia que una matriz presenta un nivel de consistencia aceptable cuando su Razón de Consistencia es $CR \leq 0{,}10$ (Saaty, 1980).

Por lo tanto, un valor de CR igual o inferior a 0,10 indica que las comparaciones presentan un nivel de consistencia aceptable para continuar con la aplicación del método AHP. En caso de obtenerse un valor superior a este límite, se revisan los juicios incorporados en la matriz de comparación por pares antes de utilizar las ponderaciones resultantes en la evaluación de las alternativas.

8.4.2. Evaluación de las alternativas y obtención de la prioridad global

Una vez determinadas las ponderaciones de los criterios y verificada la consistencia de la matriz de comparación, se procede a evaluar las alternativas consideradas en la investigación. Esta etapa tiene como propósito determinar la preferencia relativa entre el cierre definitivo de la Central Termoeléctrica Guacolda y su reconversión mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón para cada uno de los criterios definidos previamente.

Para ello, se realiza una comparación por pares de ambas alternativas respecto de cada criterio C_i. De esta manera, para cada uno de los n criterios se construye una matriz de comparación de dimensión 2×2, en la cual se determina la preferencia relativa de una alternativa respecto de la otra.

La matriz correspondiente al criterio C_i se representa de manera general, donde M_i corresponde a la matriz de comparación de las alternativas para el criterio C_i, mientras que a_i representa la valoración del cierre definitivo respecto de la reconversión para dicho criterio y, la comparación inversa, correspondiente a la valoración de la reconversión respecto del cierre, se representa mediante el valor recíproco $\frac{1}{a_i}$. Por su parte, los elementos de la diagonal principal son iguales a 1, debido a que corresponden a la comparación de cada alternativa consigo misma, obteniendo la matriz representada en la Ecuación 15:

$$M_i = \begin{pmatrix} 1 & a_i \\ 1/a_i & 1 \end{pmatrix}. \tag{15}$$

Los valores a_i se determinan a partir del análisis de los antecedentes bibliográficos y documentales recopilados para cada criterio. Esta información permite establecer cuál de las dos alternativas presenta un desempeño más favorable respecto del criterio analizado y determinar la intensidad de dicha preferencia mediante la escala de Saaty, presentada previamente en la Tabla 3.

Una vez establecidos los valores que conforman cada matriz M_i, se procede a determinar las prioridades locales de las alternativas respecto de cada criterio. Para ello, se utiliza el mismo procedimiento de normalización desarrollado previamente en el apartado 9.4.1. En primer lugar, se obtiene la suma de los elementos de cada columna de la matriz y, posteriormente, cada elemento se divide por la suma correspondiente a su columna. De esta manera, se obtiene una matriz normalizada en la que la suma de los elementos de cada columna es igual a 1.

A partir de la matriz normalizada, se calcula el promedio de los elementos de cada fila. Este procedimiento permite obtener la prioridad local correspondiente a cada alternativa respecto del criterio C_i. Por lo tanto, para cada criterio se obtienen dos prioridades: una asociada al cierre definitivo y otra correspondiente a la reconversión.

Estas prioridades se representan mediante el vector R_i que corresponde al vector de prioridades locales asociado al criterio C_i. En el vector, r_{Ai} representa la prioridad local del cierre definitivo de la central y, r_{Bi} corresponde a la prioridad local de la reconversión de la central, como se muestra en la Ecuación 16:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{A_i} \\ r_{B_i} \end{pmatrix} . \tag{16}$$

Al tratarse de prioridades relativas obtenidas a partir de una matriz normalizada, ambas cumplen la relación de la Ecuación 17:

$$r_{Ai} + r_{Bi} = 1 . \tag{17}$$

Este procedimiento se realiza para cada uno de los n criterios considerados, obteniéndose un vector de prioridades locales R_i para cada uno de ellos. De esta manera, se determina la preferencia relativa entre el cierre y la reconversión de forma independiente para cada criterio, antes de incorporar las ponderaciones p_i obtenidas previamente.

Debido a que las matrices de comparación de las alternativas son de dimensión 2×2 y mantienen la propiedad de reciprocidad, presentan consistencia perfecta. En consecuencia, no resulta necesario aplicar nuevamente el procedimiento de verificación de consistencia desarrollado en el apartado 9.4.1.

A continuación, la Tabla 8 presenta un resumen organizado de las prioridades locales obtenidas para la alternativa (A): cierre y la alternativa (B): reconversión, para cada criterio de evaluación. Estas prioridades representan la preferencia relativa de cada alternativa respecto de cada criterio y constituyen la base para su posterior integración con las ponderaciones globales.

Tabla 8. Estructura de las prioridades locales de las alternativas por criterio.

Criterio	Alternativa A: Cierre	Alternativa B: Reconversión
C_1	r_{A1}	r_{B1}
C_2	r_{A2}	r_{B2}
C_3	r_{A3}	r_{B3}
⋮	⋮	⋮
C_n	r_{An}	r_{Bn}

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas las prioridades locales de ambas alternativas para cada criterio, se procede a integrarlas con las ponderaciones p_i determinadas previamente. Esta etapa permite incorporar en la evaluación final tanto la importancia relativa de cada criterio como la preferencia obtenida por cada alternativa respecto de ellos.

Para realizar esta integración, la prioridad local de cada alternativa respecto del criterio C_i se multiplica por la ponderación p_i correspondiente a dicho criterio. Posteriormente, los resultados obtenidos se suman considerando la totalidad de los n criterios. De esta manera, la prioridad global de la alternativa A, correspondiente al cierre definitivo, se determina mediante la Ecuación 18:

$$G_A = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot r_{Ai} \,. \tag{18}$$

Para la alternativa B, correspondiente a la reconversión, se obtiene según Ecuación 19:

$$G_B = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot r_{Bi} \,. \tag{19}$$

Donde G_A y G_B representan las prioridades globales del cierre y la reconversión, respectivamente; p_i corresponde a la ponderación del criterio C_i; y r_{Ai} y r_{Bi} representan las prioridades locales de cada alternativa respecto de dicho criterio.

Las prioridades globales obtenidas para ambas alternativas pueden representarse mediante un vector de prioridad global llamado G, que representa el resultado final del proceso de evaluación, integrando las ponderaciones de los criterios con las prioridades locales obtenidas para cada alternativa. (Ecuación 20)

$$G = \begin{pmatrix} G_A \\ G_B \end{pmatrix}. \tag{20}$$

Debido a que tanto las ponderaciones de los criterios como las prioridades locales se encuentran normalizadas, las prioridades globales cumplen la siguiente relación, según la Ecuación 21:

$$G_A + G_B = 1 \,. \tag{21}$$

De esta manera, cada alternativa obtiene una prioridad global que sintetiza su evaluación respecto del conjunto de criterios considerados. La comparación entre G_A y G_B permite establecer el orden de preferencia entre ambas alternativas, correspondiendo la mayor prioridad global a aquella que presenta una mayor preferencia relativa de acuerdo con la estructura de evaluación definida mediante el método AHP. En particular, la alternativa que presente el mayor valor de prioridad global se considera más favorable dentro de la evaluación multicriterio, de acuerdo con los criterios y ponderaciones establecidos.

8.4.3. Análisis de sensibilidad

Una vez obtenidas las prioridades globales de las alternativas, se realiza un análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar la estabilidad de la priorización frente a cambios en las ponderaciones de los criterios y en el desempeño relativo de las alternativas. Para ello, se consideran distintos ejercicios de sensibilidad, manteniendo como referencia el escenario base obtenido mediante el método AHP.

La incorporación de este análisis se sustenta en aplicaciones previas del método AHP, donde la sensibilidad se utiliza para evaluar la robustez de los resultados frente a modificaciones en los parámetros del modelo. Triantaphyllou y Sánchez (1997) proponen analizar tanto variaciones en las ponderaciones de los criterios como cambios en el desempeño de las alternativas. Asimismo, en el ámbito energético, Chatzimouratidis y Pilavachi (2009) aplican análisis de sensibilidad sobre las ponderaciones para evaluar la estabilidad de los resultados obtenidos mediante AHP en la comparación de distintas alternativas de generación eléctrica.

Sensibilidad de las ponderaciones de los criterios

Se evalúa la estabilidad de la priorización global frente a cambios en las ponderaciones p_i asignadas a los criterios. En estos ejercicios se mantienen constantes las prioridades locales r_{Ai} y r_{Bi} obtenidas para el cierre definitivo y la reconversión, modificándose únicamente la importancia relativa de los criterios.

En primer lugar, se realizan variaciones individuales de ±10 % y ±20 % sobre las ponderaciones del criterio seleccionado. Para un criterio C_k, la nueva ponderación se representa mediante p'_k, donde, δ puede tomar los valores $-0{,}20$, $-0{,}10$, $0{,}10$ y $0{,}20$. Esto se representa en la Ecuación 22:

$$p'_k = p_k(1+\delta)\ . \tag{22}$$

Debido a que las ponderaciones deben mantener una suma igual a 1, los pesos

de los criterios restantes se reajustan proporcionalmente mediante la Ecuación 23:

$$p'_j = p_j \left(\frac{1-p'_k}{1-p_k}\right), \qquad j \neq k \tag{23}$$

Con el nuevo vector de ponderaciones se recalculan las prioridades globales utilizando la Ecuación 24 y 25.

$$G'_A = \sum_{i=1}^{n} p'_i \cdot r_{Ai} \tag{24}$$

$$G'_B = \sum_{i=1}^{n} p'_i \cdot r_{Bi} \tag{25}$$

Las variaciones se aplican a criterios seleccionados por su mayor influencia dentro del modelo y por representar aspectos económicos, sociales y ambientales relevantes para el caso de estudio. Los cambios obtenidos permiten analizar cómo podría responder la priorización ante escenarios en que alguno de estos factores adquiera una mayor o menor importancia relativa.

Sensibilidad del desempeño de las alternativas

En el segundo análisis de sensibilidad, se evalúa cómo cambia la priorización global cuando se modifican las condiciones bajo las cuales se desempeñan el cierre definitivo y la reconversión en determinados criterios. A diferencia del análisis anterior, en este caso las ponderaciones p_i de los criterios se mantienen constantes y se modifican únicamente las prioridades locales de las alternativas.

Para un criterio C_i, el vector de prioridades locales original se reemplaza por un nuevo vector de acuerdo con la Ecuación 26:

$$R'_i = \begin{pmatrix} r'_{Ai} \\ r'_{Bi} \end{pmatrix}, \tag{26}$$

manteniendo la condición establecida por Ecuación 27:

$$r'_{Ak} + r'_{Bk} = 1\ . \tag{27}$$

Los nuevos valores se establecen a partir de escenarios en los que cambian condiciones relevantes para el desempeño de las alternativas. Para este análisis, se seleccionan criterios cuyo comportamiento pueda verse afectado de manera plausible por cambios futuros en las condiciones económicas, tecnológicas, sociales o ambientales y que, por su incidencia dentro del modelo, puedan modificar la priorización global de las alternativas.

9. ALCANCE

La presente investigación posee un alcance principalmente descriptivo, con elementos exploratorios. Su carácter descriptivo se relaciona con la identificación, caracterización y comparación de los principales aspectos económicos, sociales y ambientales asociados al cierre y reconversión de centrales termoeléctricas a carbón. A partir de ello, se estructura una evaluación que permite ordenar las principales diferencias entre ambas alternativas y determinar su importancia relativa dentro del problema de decisión.

El componente exploratorio se vincula con el análisis de la reconversión mediante co-combustión con amoníaco, una alternativa aún en desarrollo y con antecedentes recientes en el contexto chileno. Para su estudio, se reúne y analiza información técnica, económica, social y ambiental disponible, con el propósito de comprender sus principales implicancias frente al cierre de una central a carbón.

La evaluación se desarrolla mediante el método AHP y se aplica al caso de la Central Termoeléctrica Guacolda, comparando su cierre definitivo con una reconversión mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. De esta manera, la investigación integra distintos factores dentro de una evaluación común, permitiendo establecer una priorización entre ambas alternativas y aportar una visión integral del problema dentro del proceso de descarbonización chileno.

10. RESULTADO

10.1. Fundamentación de las comparaciones entre criterios

La determinación de la importancia relativa de los criterios se realiza a partir de la revisión de antecedentes bibliográficos, documentos técnicos e información específica asociada al caso de estudio. Estos antecedentes permiten sustentar las comparaciones por pares y asignar las intensidades correspondientes de acuerdo con la escala fundamental de Saaty presentada en la Tabla 3, donde se distinguen niveles de igual importancia, importancia moderada, fuerte, muy fuerte y extrema, además de valores intermedios entre estas categorías.

Con el fin de presentar de manera ordenada los fundamentos utilizados en las comparaciones, los criterios se organizan según las categorías: económica, social y ambiental, definidas previamente. Esta clasificación responde únicamente a una lógica de organización del análisis, ya que la importancia relativa de los criterios se determina mediante comparaciones directas entre ellos, sin asignar ponderaciones independientes a cada categoría.

Criterios Económicos

Dentro de los aspectos económicos, la inversión requerida (C1) constituye un elemento central, ya que toda alternativa de cierre o reconversión exige recursos iniciales para poder materializarse. En los procesos de retiro de centrales a carbón, estos recursos se relacionan con actividades de desmantelamiento, remediación y gestión de activos, mientras que las alternativas de reconversión requieren nuevas inversiones para adaptar la infraestructura existente. El Banco Mundial (2021) destaca precisamente que tanto el cierre como la reutilización de centrales implican costos de implementación relevantes, los cuales pueden influir directamente en la

factibilidad de cada alternativa. De manera similar, Jindal y Shrimali (2022) muestran que las opciones de reutilización pueden generar beneficios económicos importantes, pero requieren igualmente inversiones de capital para su ejecución.

La sostenibilidad económica de la alternativa (C2) también presenta una alta relevancia, ya que amplía el análisis hacia las condiciones económicas posteriores a la implementación. Este aspecto resulta especialmente importante en escenarios de reconversión, donde los costos de operación, mantenimiento y abastecimiento de combustible pueden afectar significativamente la sostenibilidad económica de la alternativa en el tiempo. Deng et al. (2024) muestran que, aun cuando la co-combustión con amoníaco puede presentar ventajas en términos de inversión frente a otras tecnologías de reducción de emisiones, sus costos operacionales pueden aumentar de manera considerable debido principalmente al precio del amoníaco. Asimismo, la disponibilidad y confiabilidad del abastecimiento de los insumos necesarios para mantener la operación constituyen factores relevantes para su sostenibilidad en el tiempo. Esto evidencia que una alternativa no puede evaluarse únicamente por el desembolso inicial, sino también por los costos e ingresos que mantiene en el tiempo y por su capacidad de sostener económicamente la operación. En este sentido, el cierre elimina costos recurrentes, pero también los ingresos asociados al funcionamiento de la central, mientras que la reconversión mantiene ambos componentes y conserva la posibilidad de generar retornos económicos en el largo plazo.

Por su parte, la infraestructura, desmantelamiento y reutilización (C3) considera las implicancias asociadas al destino, intervención y aprovechamiento de los activos e instalaciones existentes. La literatura señala que la reconversión de centrales puede permitir el aprovechamiento de elementos como terrenos, conexiones eléctricas, subestaciones y otros componentes, reduciendo la pérdida de valor

asociada al retiro definitivo (World Bank, 2021; Jindal & Shrimali, 2022). En contraste, el cierre puede requerir actividades de desmantelamiento, remediación y gestión de los activos que dejan de utilizarse. En Guacolda, esta posibilidad adquiere especial relevancia, ya que el proyecto de co-combustión con amoníaco considera precisamente el uso de instalaciones principales existentes como base para la adaptación tecnológica (Mitsubishi Heavy Industries [MHI], 2022).

En conjunto, los antecedentes muestran que la inversión inicial y la sostenibilidad económica tienen una incidencia amplia sobre la posibilidad de implementar y mantener las alternativas, mientras que la gestión, reutilización y eventual desmantelamiento de la infraestructura constituye un aspecto relevante para evaluar el destino de los activos existentes, pero depende de que los activos puedan integrarse efectivamente a una solución técnica y económicamente viable. Por ello, este último criterio presenta un carácter más complementario dentro del análisis económico, sin dejar de constituir un elemento relevante para evaluar.

Criterios Sociales

Dentro de los aspectos sociales, el impacto socioeconómico local (C4) adquiere especial relevancia debido a la relación que existe entre Guacolda y la actividad económica de Huasco. El estudio sociolaboral desarrollado para el Ministerio de Energía identifica aproximadamente 200 trabajadores directos y alrededor de 700 trabajadores indirectos vinculados a servicios como alimentación, transporte, operación portuaria y mantenimiento. El mismo informe advierte que un eventual cierre podría generar efectos sobre una parte importante de la población vinculada a estas actividades y también sobre los ingresos municipales asociados a la operación de la empresa (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Esta situación coincide con la evidencia internacional sobre procesos de salida

del carbón. La International Energy Agency (IEA, 2024) señala que los efectos sociales y económicos de estas transiciones pueden concentrarse fuertemente en determinadas localidades, especialmente cuando existe dependencia de una actividad productiva específica. En este contexto, la pérdida de puestos de trabajo puede afectar no solo a los trabajadores directamente involucrados, sino también a sus familias, proveedores y otras actividades económicas relacionadas con la industria (IEA, 2024). De esta manera, el impacto socioeconómico local presenta un alcance amplio, ya que considera efectos que se extienden más allá de los trabajadores de la central.

Este análisis adquiere especial relevancia al considerar las condiciones actuales del mercado laboral. Durante el trimestre junio-agosto de 2026, la tasa de desocupación alcanzó un 9,6 % a nivel nacional y un 9,5 % en la Región de Atacama, evidenciando un escenario en el que la pérdida de empleos asociados a actividades relevantes para determinados territorios puede incrementar las dificultades de reinserción laboral (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2026).

Por otra parte, la reconversión laboral (C5) resulta relevante para determinar las posibilidades de adaptación de los trabajadores frente a los cambios generados por cualquiera de las alternativas. En Huasco, los antecedentes recopilados por el Ministerio de Energía indican que parte de los trabajadores posee experiencia técnica que podría ser transferida hacia nuevas actividades, aunque ello requiere procesos de capacitación y desarrollo de nuevas competencias. Entre las áreas identificadas se encuentran actividades vinculadas con energías renovables, agricultura tecnificada, minería, turismo y otros sectores productivos presentes o potenciales en el territorio (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Sin embargo, la existencia de nuevas actividades económicas no asegura una transición laboral directa. La IEA (2024) advierte que los nuevos empleos asociados a la transición energética pueden localizarse en territorios distintos o requerir

competencias diferentes a las de los trabajadores provenientes del carbón, por lo que la capacitación, la orientación laboral y los programas de reinserción cumplen un papel importante en estos procesos. En este sentido, la reconversión laboral constituye un elemento relevante, aunque presenta un alcance más específico que el impacto socioeconómico local, al concentrarse principalmente en la capacidad de adaptación y continuidad laboral de los trabajadores afectados.

Criterios Ambientales

Dentro de los aspectos ambientales, las emisiones de gases de efecto invernadero (C6) presentan una alta relevancia debido a que su reducción constituye uno de los principales objetivos del proceso de descarbonización del sistema eléctrico chileno. El Plan de Descarbonización incorpora explícitamente el retiro o reconversión de las centrales a carbón y establece para Guacolda una trayectoria de disminución progresiva del uso de este combustible mediante co-combustión con amoníaco (Ministerio de Energía, 2025). Esta orientación mantiene vigencia en la planificación más reciente: la Ruta Energética 2026–2030, publicada por el Ministerio de Energía, incorpora la transición energética y la transformación del sistema entre sus ejes prioritarios, señalando la necesidad de continuar reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones del sector (Ministerio de Energía, 2026). Por lo tanto, las emisiones de GEI no representan únicamente un efecto ambiental adicional, sino un aspecto directamente vinculado con uno de los objetivos que actualmente orientan la transformación del sistema energético nacional.

Su relevancia también se sustenta desde una perspectiva ambiental de mayor alcance, ya que las emisiones de GEI contribuyen al cambio climático independientemente del lugar específico donde se generan. En el caso de la generación termoeléctrica, la sustitución parcial del carbón por amoníaco producido

mediante fuentes renovables puede disminuir las emisiones de carbono, aunque el beneficio obtenido depende del proceso utilizado para producir y suministrar dicho combustible (Sun et al., 2023). De esta manera, incorporar este criterio permite evaluar en qué medida las decisiones consideradas son coherentes con el proceso de reducción de emisiones que motiva la transición desde el carbón.

Por otra parte, la calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7) también presenta una relevancia elevada, pero asociada principalmente a los efectos que la operación de instalaciones termoeléctricas puede generar sobre las comunidades cercanas. Este criterio adquiere especial importancia en Huasco, donde existen antecedentes que relacionan la exposición a centrales a carbón con problemas de salud respiratoria. Viviani et al. (2021) reportan que la población de Huasco presenta mayores tasas de morbilidad por enfermedades respiratorias que la comuna utilizada como control y estiman, para 2016, un riesgo 2,49 veces mayor de enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores y 3,19 veces mayor de asma respecto de la población regional de referencia. Al tratarse de un estudio ecológico, estos resultados no permiten atribuir causalidad individual, pero sí muestran que la calidad ambiental local y sus posibles efectos sobre la salud constituyen un aspecto relevante para la evaluación del territorio.

Además, este criterio resulta necesario porque una reducción de GEI no implica necesariamente una disminución equivalente de todos los contaminantes atmosféricos locales. La experiencia internacional con co-combustión de amoníaco muestra que contaminantes como NOx y SOx pueden responder de manera distinta según la tecnología y las condiciones de combustión. En la demostración realizada en la Central Hekinan, por ejemplo, una sustitución de 20 % de amoníaco mantuvo los niveles de NOx en valores comparables a la operación con carbón y redujo aproximadamente en 20 % las emisiones de SOx (JERA, 2024). Estos antecedentes

muestran que la calidad ambiental local y sus efectos sobre la salud requieren una evaluación diferenciada y no pueden quedar representados únicamente mediante las emisiones de GEI.

En conjunto, ambos criterios resultan relevantes dentro de la evaluación ambiental, aunque responden a escalas distintas. Las emisiones de GEI presentan un alcance más amplio al vincularse directamente con los objetivos de descarbonización del sistema eléctrico, mientras que la calidad ambiental y sus efectos sobre la salud adquieren una importancia principalmente local, especialmente por sus consecuencias sobre la población de Huasco. De esta forma, ambos criterios se complementan dentro del análisis, aunque las emisiones de GEI poseen un carácter más transversal en la transición energética.

Comparaciones clave entre criterios

A partir de los antecedentes analizados, la inversión requerida (C1) y el impacto socioeconómico local (C4) presentan una importancia elevada y relativamente cercana. La inversión mantiene una prioridad ligera sobre el impacto socioeconómico, ya que constituye una condición necesaria para materializar cualquiera de las alternativas. Sin embargo, la diferencia se mantiene acotada debido a la fuerte relación existente entre Guacolda y la actividad laboral y económica de Huasco, donde los efectos de una transformación de la central pueden extenderse hacia trabajadores, contratistas, proveedores y sus familias (Ministerio de Energía, 2024).

Por su parte, las emisiones de GEI (C6) adquieren una prioridad relevante frente a la sostenibilidad económica de la alternativa (C2). La diferencia se considera acotada, dado que ambos aspectos son fundamentales para evaluar una transición energética sostenible. No obstante, la reducción de GEI se encuentra directamente

vinculada con el objetivo de descarbonización que orienta actualmente la transformación del sistema eléctrico chileno y continúa presente en la planificación energética nacional (Ministerio de Energía, 2025, 2026). Por ello, se establece una prioridad ligera de las emisiones de GEI sobre la sostenibilidad económica, sin considerar una diferencia mayor que subestime la importancia de mantener alternativas económicamente viables.

También se observa una diferencia más clara entre los criterios de alcance amplio y aquellos que abordan aspectos más específicos. El impacto socioeconómico local presenta una prioridad intermedia entre moderada y fuerte respecto de la reconversión laboral (C5), debido a que el primero comprende efectos sobre el conjunto de la economía local, mientras que la reconversión laboral se concentra específicamente en las posibilidades de adaptación de los trabajadores. La literatura sobre transición justa respalda esta distinción, señalando que los efectos territoriales del retiro del carbón abarcan empleo, proveedores, actividad económica y medios de vida, mientras que la capacitación constituye una herramienta particular dentro de un proceso social más amplio (IEA, 2024).

Criterios como la calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7) y la infraestructura, desmantelamiento y reutilización (C3), mantienen una importancia dentro de la evaluación, aunque su alcance resulta más acotado frente a criterios directamente vinculados con la implementación, los efectos territoriales o los objetivos centrales de descarbonización. En particular, la calidad ambiental conserva una prioridad relevante por sus efectos directos sobre la población de Huasco, mientras que la gestión, reutilización y eventual desmantelamiento de la infraestructura cumplen un rol más complementario, debido a que su valor depende de que los activos puedan integrarse efectivamente a una alternativa viable.

Finalmente, entre los criterios más específicos, la infraestructura,

desmantelamiento y reutilización (C3), mantiene una prioridad algo mayor que la reconversión laboral (C5). La reutilización de activos existentes puede conservar parte del valor de una central, reducir requerimientos de nueva infraestructura y aprovechar elementos ya disponibles, como conexiones a transmisión, terrenos y equipos, generando beneficios económicos y operacionales adicionales (World Bank, 2021; Jindal & Shrimali, 2022). En el escenario de cierre, el criterio también considera los requerimientos asociados al desmantelamiento y gestión de los activos que dejan de utilizarse. Por su parte, la reconversión laboral cumple un rol relevante dentro de una transición justa, especialmente mediante capacitación, orientación y apoyo a la reinserción; sin embargo, la IEA la identifica como una de varias medidas necesarias para abordar los efectos sociales más amplios de la salida del carbón (IEA, 2024). En este contexto, la gestión, reutilización y eventual desmantelamiento de la infraestructura presentan un alcance ligeramente más amplio dentro de la evaluación, mientras que la reconversión laboral se concentra específicamente en la adaptación de los trabajadores.

En conjunto, los antecedentes revisados permiten establecer diferencias en la importancia relativa de los criterios, considerando tanto su alcance dentro del problema de decisión como su relevancia para el caso particular de Guacolda. Estas relaciones constituyen la base para asignar las intensidades de comparación mediante la escala de Saaty y construir la matriz de comparación por pares.

10.2. Ponderación de los criterios

A partir de los antecedentes analizados en el apartado anterior, se asignan las intensidades de importancia relativa entre los siete criterios utilizando la escala fundamental de Saaty presentada en la Tabla 3. Cada valoración representa la importancia del criterio ubicado en la fila respecto del criterio ubicado en la columna,

mientras que la relación inversa se expresa mediante su valor recíproco, de acuerdo con el procedimiento definido en la metodología.

Las comparaciones consideran las diferencias de alcance, relevancia y efecto de cada criterio dentro del problema de decisión. De esta forma, relaciones cercanas se representan mediante valores bajos de la escala, mientras que diferencias más marcadas utilizan intensidades mayores. La Tabla 9 presenta la matriz de comparación por pares obtenida.

Tabla 9. Matriz de comparación por pares de los criterios con valores Saaty.

Criterio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	2	3	2	3	2	2
C2	1/2	1	3	1/2	4	1/2	3
C3	1/3	1/3	1	1/4	2	1/3	1/2
C4	1/2	2	4	1	4	2	3
C5	1/3	1/4	1/2	1/4	1	1/3	1
C6	1/2	2	3	1/2	3	1	2
C7	1/2	1/3	2	1/3	1	1/2	1

Fuente: Elaboración propia.

En forma matricial, las comparaciones anteriores se expresan según la Ecuación 28:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 2 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & \frac{1}{2} & 4 & \frac{1}{2} & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 2 & 4 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{2} & 2 & 3 & \frac{1}{2} & 3 & 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

El siguiente paso corresponde a calcular la suma de los elementos de cada columna S_j de la matriz, de acuerdo con la Ecuación 2 presentada en la metodología.

Por ejemplo, para C1. Inversión requerida, se suman los siete valores correspondientes a la primera columna de la matriz (Ecuación 29).

$$S_1 = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 3{,}6667\ . \tag{29}$$

Replicando el procedimiento anterior, se obtiene el vector *S* con los valores para los siete criterios, como se muestran en la Ecuación 30:

$$S = (3{,}6667 \quad 7{,}9167 \quad 16{,}50 \quad 4{,}8333 \quad 18{,}00 \quad 6{,}6667 \quad 12{,}50)\ . \tag{30}$$

A partir de estos valores se procede a normalizar cada elemento de la matriz, dividiendo por la suma de su respectiva columna, representado en la Ecuación 31:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0{,}2727 & 0{,}2526 & 0{,}1818 & 0{,}4138 & 0{,}1667 & 0{,}3000 & 0{,}1600 \\ 0{,}1364 & 0{,}1263 & 0{,}1818 & 0{,}1034 & 0{,}2222 & 0{,}0750 & 0{,}2400 \\ 0{,}0909 & 0{,}0421 & 0{,}0606 & 0{,}0517 & 0{,}1111 & 0{,}0500 & 0{,}0400 \\ 0{,}1364 & 0{,}2526 & 0{,}2424 & 0{,}2069 & 0{,}2222 & 0{,}3000 & 0{,}2400 \\ 0{,}0909 & 0{,}0316 & 0{,}0303 & 0{,}0517 & 0{,}0556 & 0{,}0500 & 0{,}0800 \\ 0{,}1364 & 0{,}2526 & 0{,}1818 & 0{,}1034 & 0{,}1667 & 0{,}1500 & 0{,}1600 \\ 0{,}1364 & 0{,}0421 & 0{,}1212 & 0{,}0690 & 0{,}0556 & 0{,}0750 & 0{,}0800 \end{pmatrix}. \tag{31}$$

Como resultado de la normalización, la suma de los elementos de cada columna es igual a 1, permitiendo comparar los criterios bajo una misma escala relativa, tal como se establece en la metodología.

Una vez obtenida la matriz normalizada, se calcula la ponderación correspondiente a cada criterio. Para ello, se trabaja con cada fila de la matriz de manera independiente, considerando que cada una representa uno de los siete criterios evaluados. En primer lugar, se suman los valores normalizados contenidos en la fila y, posteriormente, este resultado se divide por el número total de criterios. De esta manera, se obtiene el promedio de cada fila, el cual corresponde a la ponderación

relativa p_i del criterio respectivo, como se observa en la Ecuación 5.

Por ejemplo, para el criterio C1. Inversión requerida, p_1 se calcula utilizando la Ecuación 32:

$$p_1 = \frac{0,2727+0,2526+0,1818+0,4138+0,1667+0,3000+0,1600}{7} = 0,2497\ . \quad (32)$$

Aplicando el mismo procedimiento a las siete filas se obtiene el vector *P*, representado en la Ecuación 33:

$$P = \begin{pmatrix} 0,2497 \\ 0,1550 \\ 0,0638 \\ 0,2286 \\ 0,0557 \\ 0,1644 \\ 0,0827 \end{pmatrix}. \quad (33)$$

La suma de sus componentes es igual a 1, cumpliendo la condición establecida para el vector de ponderaciones.

Cada elemento p_i del vector P corresponde al peso relativo del criterio C_i dentro del problema de decisión. De esta manera, p_1 representa la ponderación de $C1$, p_2 la de $C2$, y así sucesivamente hasta p_7. Estos valores reflejan la importancia relativa obtenida para cada criterio a partir de la matriz de comparación por pares y constituyen la base para la evaluación posterior de las alternativas.

A partir del vector de ponderaciones *P* obtenido anteriormente, los valores se expresan en términos porcentuales con el propósito de facilitar su interpretación. La Tabla 10 presenta las ponderaciones obtenidas para los siete criterios, ordenadas de mayor a menor.

Tabla 10. Ponderaciones obtenidas para los criterios de evaluación.

Posición	Criterio	Ponderación
1	C1. Inversión requerida	24,97 %
2	C4. Impacto socioeconómico local	22,86 %
3	C6. Emisiones de GEI	16,44 %
4	C2. Sostenibilidad económica de la alternativa	15,50 %
5	C7. Calidad ambiental y efectos sobre la salud	8,27 %
6	C3. Infraestructura, desmantelamiento y reutilización	6,38 %
7	C5. Reconversión laboral	5,57 %

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la inversión requerida (C1) obtiene la mayor ponderación, seguida por el impacto socioeconómico local (C4). En conjunto, ambos criterios alcanzan un 47,83 % de la ponderación total, concentrando prácticamente la mitad de la importancia considerada en la evaluación.

Si los criterios se agrupan de manera descriptiva según las categorías utilizadas previamente, los aspectos económicos concentran aproximadamente un 46,85 %, los sociales un 28,43 % y los ambientales un 24,71 % de la ponderación total. Esta agrupación no corresponde a una ponderación independiente de las categorías, sino que resulta de sumar los pesos obtenidos por los criterios que las componen. El resultado muestra que, aunque los aspectos económicos presentan una mayor participación conjunta, las categorías social y ambiental mantienen una presencia significativa dentro de la evaluación.

Asimismo, los cuatro criterios con mayor ponderación (inversión requerida, impacto socioeconómico local, emisiones de GEI y sostenibilidad económica) concentran aproximadamente un 79,77 % del peso total. Esto indica que la evaluación se encuentra principalmente determinada por factores asociados a la implementación y sostenibilidad económica de las alternativas, sus efectos sobre el territorio y su contribución al proceso de descarbonización. Una vez obtenidas las ponderaciones,

se verifica la consistencia de las comparaciones realizadas. Para ello, se sigue el procedimiento definido en el apartado metodológico, comenzando por la multiplicación de la matriz de comparación A por el vector de ponderaciones P, de acuerdo con la Ecuación 8.

De esta operación se obtiene el vector Q (Ecuación 34).

$$Q = \begin{pmatrix} 1{,}8698 \\ 1{,}1389 \\ 0{,}4635 \\ 1{,}7186 \\ 0{,}4043 \\ 1{,}2376 \\ 0{,}6010 \end{pmatrix}. \tag{34}$$

Posteriormente, cada elemento q_i se divide por la ponderación p_i correspondiente, obteniéndose un valor λ_i para cada criterio, según la Ecuación 11 presentada en la metodología. Con esto, los resultados para λ_i son los registrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Ponderaciones, vector Q y valores λ_i por criterio.

Criterio	p_i	q_i	$\lambda_i = \frac{q_i}{p_i}$
C1	0,2497	1,8698	7,4895
C2	0,1550	1,1389	7,3463
C3	0,0638	0,4635	7,2667
C4	0,2286	1,7186	7,5164
C5	0,0557	0,4043	7,2554
C6	0,1644	1,2376	7,5273
C7	0,0827	0,6010	7,2629

Fuente: Elaboración propia.

A partir del promedio de los siete valores de λ_i , se obtiene $\lambda_{max} = 7{,}3806$, con el cual se calcula el Índice de Consistencia. Empleando la Ecuación 13, se obtiene un valor de $CI = 0{,}0634$, equivalente a $6{,}34\%$.

Dado que la matriz considera siete criterios, el Índice Aleatorio correspondiente es $RI = 1{,}32$, de acuerdo con la Tabla 7. Por lo tanto, utilizando la Ecuación 14, se obtiene una Razón de Consistencia de $0{,}0481$, equivalente a $4{,}81\%$ valor inferior al límite de 10% establecido para considerar aceptable la consistencia de una matriz AHP. Por lo tanto, las comparaciones realizadas presentan un nivel de coherencia adecuado y las ponderaciones obtenidas pueden utilizarse para continuar con la evaluación de las alternativas.

10.3. Evaluación de las alternativas por criterio

Una vez determinadas las ponderaciones de los criterios y verificada la consistencia de la matriz de comparación, se procede a evaluar las dos alternativas consideradas para la Central Termoeléctrica Guacolda: el cierre definitivo y la reconversión mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. Esta evaluación se realiza de manera independiente para cada criterio, mediante matrices de comparación por pares de dimensión 2×2, siguiendo el procedimiento establecido en la metodología.

Para cada criterio se determina cuál de las dos alternativas presenta un desempeño más favorable y la intensidad de dicha preferencia, utilizando la escala fundamental de Saaty presentada en la Tabla 3. A partir de cada matriz se obtienen las prioridades locales del cierre y la reconversión, cuya suma es igual a 1. Estas prioridades representan el desempeño relativo de ambas alternativas respecto de cada criterio y posteriormente se integran con las ponderaciones obtenidas en el apartado anterior para calcular la prioridad global.

A diferencia de la matriz utilizada para ponderar los siete criterios, las matrices correspondientes a las alternativas son de dimensión 2×2 y, al mantener la propiedad de reciprocidad, presentan consistencia perfecta. Por esta razón, no resulta

necesario calcular nuevamente la Razón de Consistencia para cada una de ellas.

C1. Inversión requerida

Para la inversión requerida (C1), se considera más favorable la alternativa que exige un menor desembolso inicial para su implementación. Ambas opciones implican costos relevantes. El cierre definitivo requiere actividades de desmantelamiento, demolición, manejo de residuos y recuperación del emplazamiento. Como referencia nacional, el proyecto de cierre de la Central Termoeléctrica Tarapacá y su vertedero de cenizas declaró una inversión de USD 42,87 millones, destinada a actividades de desmantelamiento, demolición y limpieza de las instalaciones (Servicio de Evaluación Ambiental [SEA], 2022).

La reconversión de Guacolda también requiere una inversión inicial, debido a las modificaciones necesarias para incorporar la co-combustión con amoníaco. El estudio de factibilidad desarrollado por Mitsubishi Heavy Industries contempla la instalación de quemadores de amoníaco y otros equipos asociados a las calderas, manteniendo parte de las instalaciones principales existentes (Mitsubishi Heavy Industries [MHI], 2022). Si bien el aprovechamiento de infraestructura existente permite evitar la construcción completa de una nueva central, la reconversión incorpora sistemas adicionales necesarios para recibir, manejar y utilizar el nuevo combustible.

A partir de estos antecedentes, el cierre presenta una preferencia ligera frente a la reconversión en este criterio. La diferencia no se considera moderada o fuerte, debido a que el cierre tampoco constituye una alternativa sin inversión y, además, no se dispone públicamente de una estimación consolidada del costo total que tendría la adaptación de las cinco unidades de Guacolda al escenario de 50 % de amoníaco verde. Por esta razón, la evidencia permite establecer una ventaja para el cierre, pero

no una diferencia suficientemente amplia como para asignar una intensidad mayor.

De acuerdo con la escala presentada en la Tabla 3, esta relación se representa mediante un valor de 2, correspondiente a una intensidad intermedia entre igual importancia y una preferencia moderada. La comparación de las alternativas para este criterio queda representada por la matriz M_1, donde la primera fila y columna corresponden al cierre definitivo, y la segunda a la reconversión. (Ecuación 35).

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix}. \tag{35}$$

Al normalizar la matriz y obtener el promedio de cada fila, las prioridades locales resultantes se presentan en la Ecuación 36:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0{,}6667 \\ 0{,}3333 \end{pmatrix}. \tag{36}$$

Por lo tanto, respecto de la inversión requerida, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A1} = 66{,}67\ \%$, mientras que la reconversión alcanza un $r_{B1} = 33{,}33\ \%$. Este resultado representa únicamente el desempeño relativo de ambas alternativas frente a C1.

C2. Sostenibilidad económica de la alternativa

Para la sostenibilidad económica de la alternativa (C2), se considera más favorable aquella opción que presenta mejores condiciones para sostenerse económicamente una vez implementada, considerando los costos recurrentes, los ingresos asociados a su operación y las condiciones necesarias para mantenerla en el tiempo. Desde esta perspectiva, el cierre definitivo permite eliminar costos vinculados a operación, mantenimiento y abastecimiento de combustible, pero también implica el término de los ingresos asociados al funcionamiento de la central. En contraste, la reconversión mantiene estos costos, pero conserva la posibilidad de generar ingresos y recuperar progresivamente la inversión realizada. La literatura

muestra que la reutilización de centrales puede generar beneficios económicos frente al retiro definitivo, aunque estos dependen de las condiciones específicas de cada alternativa (Jindal & Shrimali, 2022). Asimismo, la sostenibilidad de una reconversión se encuentra condicionada por la disponibilidad, costo y confiabilidad del abastecimiento de los combustibles requeridos, aspectos vinculados a la seguridad energética y a la continuidad de la operación en el largo plazo (IEA, 2021).

En este sentido, la reconversión presenta una ventaja al permitir mantener la operación de la central y conservar una fuente de ingresos en el. Sin embargo, esta continuidad no garantiza por sí sola una sostenibilidad económica favorable. Deng et al. (2024) muestran que el costo de generación mediante co-combustión con amoníaco depende de manera importante del precio y origen del combustible. En el escenario analizado por los autores, el uso de amoníaco verde aumenta considerablemente el costo nivelado de electricidad respecto de la generación convencional a carbón, aunque su competitividad puede mejorar bajo menores costos de producción del amoníaco o determinadas condiciones operacionales. Asimismo, su sostenibilidad depende de la disponibilidad y confiabilidad del abastecimiento requerido para mantener la operación, aspecto relacionado con la seguridad energética, que puede introducir incertidumbre adicional.

Por lo tanto, la evidencia respalda una preferencia ligera de la reconversión frente al cierre. La continuidad de la operación y la posibilidad de mantener ingresos y generar retornos económicos favorecen la reconversión. Sin embargo, la incertidumbre asociada a los costos futuros y a la disponibilidad y confiabilidad del abastecimiento de combustible impide establecer una ventaja moderada o fuerte. De acuerdo con la escala presentada en la Tabla 3, esta relación se representa mediante un valor 2 a favor de la reconversión.

Considerando que la primera fila y columna representan el cierre definitivo y la segunda la reconversión, la matriz queda definida según la Ecuación 37:

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Al normalizar la matriz y obtener el promedio de cada fila (Ecuación 38).

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0{,}3333 \\ 0{,}6667 \end{pmatrix}. \quad (38)$$

Por lo tanto, para la sostenibilidad económica, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A2} = 33{,}33\ \%$ mientras que la reconversión alcanza un $r_{B2} = 66{,}67\ \%$.

C3. Infraestructura, desmantelamiento y reutilización

Para la infraestructura, desmantelamiento y reutilización (C3), la reconversión presenta una ventaja debido a que permite conservar, adaptar y reutilizar una parte importante de los activos e instalaciones existentes. Guacolda dispone de infraestructura asociada a sus unidades de generación, conexiones eléctricas, instalaciones portuarias y otros sistemas auxiliares que pueden conservar utilidad bajo un proceso de adaptación tecnológica (Guacolda Energía, 2024). En contraste, el cierre definitivo requiere gestionar aquellos activos e instalaciones que dejan de cumplir su función original, incluyendo procesos de desmantelamiento, remediación y eventual reutilización.

Esta ventaja se encuentra directamente relacionada con la propuesta de reconversión analizada. Mitsubishi Heavy Industries plantea la incorporación de la co-combustión con amoníaco utilizando instalaciones principales ya existentes, mientras que Guacolda informa que los estudios realizados consideran la adaptación progresiva de sus unidades mediante nuevos quemadores y equipos asociados (Mitsubishi Heavy Industries [MHI], 2022; Guacolda Energía, s. f.). De esta manera, la reconversión permite prolongar el uso de activos e instalaciones existentes

mediante su adaptación a una nueva configuración tecnológica.

La relevancia de esta reutilización también se observa en la literatura internacional. El Banco Mundial (2021) señala que la reconversión de centrales a carbón puede aprovechar terrenos, subestaciones, conexiones de transmisión, generadores y otros componentes existentes, evitando parte de las necesidades de nueva infraestructura.

En cambio, para efectos de esta investigación, el cierre definitivo implica gestionar la infraestructura que deja de utilizarse, considerando su desmantelamiento, remediación y las posibilidades de reutilización de determinados activos. Si bien parte de esta infraestructura podría destinarse posteriormente a otros usos, la reconversión permite conservar directamente una mayor proporción de las instalaciones existentes mediante su adaptación tecnológica.

Por estos antecedentes, se establece una preferencia fuerte de la reconversión frente al cierre, correspondiente al valor 5 de la escala presentada en la Tabla 3. Una valoración superior no se considera adecuada, debido a que el cierre no implica necesariamente la pérdida total de los activos existentes, ya que parte de la infraestructura puede ser reutilizada, reconvertida para otros usos o gestionada de manera que conserve parte de su valor.

Considerando el cierre en la primera fila y la reconversión en la segunda, la matriz queda definida según la Ecuación 39:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix}. \tag{39}$$

Al normalizar la matriz y obtener el promedio de cada fila, se obtiene R_3 según la Ecuación 40:

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0{,}1667 \\ 0{,}8333 \end{pmatrix}. \tag{40}$$

Por lo tanto, respecto de la infraestructura, desmantelamiento y reutilización, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A3} = 16{,}67\ \%$ mientras que la reconversión alcanza un $r_{B3} = 83{,}33\ \%$.

C4. Impacto Socioeconómico local

Para el impacto socioeconómico local (C4), las alternativas presentan diferencias relevantes en sus efectos sobre la actividad económica vinculada a Guacolda. El cierre definitivo supone el cese permanente de la generación de las cinco unidades, mientras que la reconversión permite mantener la operación de la central.

En el escenario de cierre, los puestos de trabajo directamente asociados a la operación de Guacolda dejan de existir en la central y también se reduce la demanda por contratistas, proveedores y servicios que dependen de su funcionamiento. Por lo tanto, el efecto no se limita a los trabajadores de la planta, sino que se extiende hacia actividades como alimentación, transporte, operación portuaria, mantenimiento y otros servicios relacionados. El estudio desarrollado para el Ministerio de Energía identifica aproximadamente 200 trabajadores directos y 700 trabajadores indirectos asociados a Guacolda y señala que un eventual cierre podría generar un problema socioeconómico importante para Huasco, incluyendo efectos sobre los ingresos municipales (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Este efecto adquiere mayor importancia debido a las características económicas y laborales del territorio. Si bien Huasco presenta actividades vinculadas a sectores como generación eléctrica, energías renovables, minería y otras actividades productivas, estas no necesariamente permiten absorber en el corto plazo la pérdida de actividad asociada al cierre de Guacolda. En consecuencia, el cierre podría dificultar la sustitución inmediata de los empleos, servicios y relaciones económicas actualmente vinculados a la central (Ministerio de Energía de Chile, 2024). En

consecuencia, el cierre no solo implica la pérdida de empleos asociados directamente a la central, sino también una mayor dificultad para reemplazar en el corto plazo la actividad laboral y económica que actualmente genera Guacolda.

La reconversión presenta una situación diferente, ya que permite mantener la operación de la central y parte de las relaciones económicas asociadas a su funcionamiento. Esto no significa que la estructura actual de empleo y contratación se mantenga sin cambios, puesto que la incorporación de una nueva tecnología puede modificar algunas funciones y requerimientos laborales. Sin embargo, en comparación con el cierre definitivo, esta alternativa permite disminuir el impacto inmediato sobre los trabajadores y servicios relacionados con la central.

Esta diferencia también puede analizarse considerando la situación reciente del mercado laboral chileno. Durante el trimestre mayo-julio de 2026, la tasa de desocupación nacional alcanzó un 9,5 %, aumentando 0,8 puntos porcentuales en doce meses, mientras que el número de personas desocupadas aumentó un 10,4 % (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2026). Frente a este escenario, el Gobierno impulsó medidas de empleo a través de la Mesa Interministerial por el Empleo, en el marco de lo que definió como una situación de emergencia laboral (Gobierno de Chile, 2026). Si bien este contexto nacional no determina una decisión particular respecto de Guacolda, muestra que la generación y mantención del empleo constituye actualmente una preocupación de política pública. Por ello, una pérdida de puestos de trabajo concentrada en una comuna como Huasco requiere especial atención y medidas de transición que permitan reducir sus efectos sobre los trabajadores y la economía local.

Considerando el cierre definitivo en la primera fila y la reconversión en la segunda, la matriz de comparación queda definida según la Ecuación 41:

$$M_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix}. \quad (41)$$

A partir de su normalización, se obtiene el vector de prioridades locales (Ecuación 42).

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0{,}1667 \\ 0{,}8333 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Por lo tanto, respecto del impacto socioeconómico local, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A4} = 16{,}67\%$ mientras que la reconversión alcanza un $r_{B4} = 83{,}33\ \%$.

C5. Reconversión laboral

Para la reconversión laboral (C5), la diferencia entre ambas alternativas se relaciona principalmente con el grado de adaptación que deberán enfrentar los trabajadores. En el escenario de cierre definitivo, quienes actualmente se desempeñan en Guacolda deben buscar oportunidades laborales fuera de la central, mientras que la reconversión permite mantener una mayor continuidad laboral dentro de una instalación que continúa operando, aunque con requerimientos tecnológicos distintos.

Los antecedentes disponibles para Huasco muestran que una parte de los trabajadores posee experiencia técnica y conocimientos que pueden ser transferidos hacia otras actividades, incluyendo empresas del sector eléctrico, proveedores, minería y energías renovables. Sin embargo, esta reinserción no es automática: puede requerir capacitación adicional, disponibilidad efectiva de vacantes e incluso relocalización geográfica o adaptación a nuevos sistemas de turnos (Ministerio de Energía de Chile, 2024). Esto implica que, bajo un escenario de cierre, los trabajadores enfrentan un proceso de transición laboral más amplio y con mayor incertidumbre.

En la alternativa de reconversión, en cambio, parte de las competencias

asociadas a la operación y mantenimiento de una central termoeléctrica continúan siendo aprovechables. Esto se relaciona con que la incorporación de amoníaco no requiere reemplazar completamente la configuración de la central, sino adaptar principalmente los sistemas vinculados con la combustión, suministro y manejo del nuevo combustible, manteniendo una parte importante de las instalaciones principales existentes (Mitsubishi Heavy Industries [MHI], 2022; IHI Corporation, 2026). En consecuencia, las necesidades de capacitación pueden variar según las funciones desempeñadas: mientras los trabajadores directamente relacionados con estos nuevos sistemas requieren incorporar conocimientos técnicos y procedimientos específicos para el manejo seguro del amoníaco, otras funciones pueden mantener una mayor continuidad respecto de la operación actual. Las experiencias de co-combustión con amoníaco también muestran la necesidad de incorporar protocolos de seguridad, detección de fugas y capacitación para responder ante eventuales incidentes (JERA, 2024). Por lo tanto, aunque la reconversión requiere procesos de adaptación y capacitación, estos se desarrollan dentro de una instalación que continúa en operación, reduciendo la necesidad de que los trabajadores deban abandonar completamente su actividad actual o trasladarse hacia otros sectores.

Esta diferencia favorece de manera clara a la reconversión. Sin embargo, no se considera apropiado asignar una valoración muy fuerte o extrema, ya que el cierre tampoco implica necesariamente que los trabajadores queden sin posibilidades de reinserción. La existencia de competencias transferibles y de sectores potenciales de destino permite reducir parcialmente esta desventaja, aun cuando las oportunidades disponibles pueden requerir nuevas competencias y no necesariamente encontrarse en Huasco.

Por estas razones, se establece una preferencia fuerte de la reconversión frente al cierre, correspondiente al valor 5 de la escala presentada en la Tabla 3.

Considerando el cierre definitivo en la primera fila y la reconversión en la segunda, la matriz queda definida mediante la Ecuación 43:

$$M_5 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{5} \\ 5 & 1 \end{pmatrix} . \quad (43)$$

A partir de su normalización se obtiene la Ecuación 44:

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0{,}1667 \\ 0{,}8333 \end{pmatrix} \quad (44)$$

Por lo tanto, respecto de la reconversión laboral, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A5} = 16{,}67\ \%$ mientras que la reconversión alcanza un $r_{B5} = 83{,}33\ \%$.

C6. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Para las emisiones de gases de efecto invernadero (C6), la diferencia entre ambas alternativas es más marcada que en los criterios anteriores. El cierre definitivo elimina las emisiones operacionales de CO_2 asociadas a la generación eléctrica con carbón en Guacolda, mientras que la reconversión disminuye estas emisiones, pero no las elimina, debido a que mantiene una participación de 50 % de carbón en la mezcla de combustible.

Los antecedentes específicos de Guacolda permiten dimensionar esta diferencia. De acuerdo con Guacolda Energía (2024), la operación de la central presenta una intensidad de emisiones cercana a 0,96 toneladas de CO_2 por MWh. En una primera etapa de co-combustión con 30 % de amoníaco, esta intensidad disminuiría a aproximadamente 0,67 tCO_2/MWh y, para la configuración evaluada en esta investigación de 50 % de amoníaco y 50 % de carbón, se proyecta una reducción hasta aproximadamente 0,48 tCO_2/MWh (Guacolda Energía, 2024). De esta forma, la reconversión permite reducir aproximadamente a la mitad las emisiones operacionales de CO_2 de la central, pero mantiene una fracción relevante asociada al carbón.

El cierre presenta, por lo tanto, un mejor desempeño frente a este criterio, ya que pone término a las emisiones operacionales derivadas de la combustión de carbón en las cinco unidades. Sin embargo, esto no significa que el cierre represente emisiones de GEI absolutamente nulas. Las actividades posteriores, como el desmantelamiento, transporte de materiales, uso de maquinaria y gestión de residuos, también pueden generar emisiones de manera temporal. Aun así, estas emisiones tienen una naturaleza distinta a las asociadas a la operación continua de una central termoeléctrica.

En el caso de la reconversión, además, el beneficio climático depende de que el amoníaco utilizado sea efectivamente producido mediante fuentes renovables. La literatura muestra que la co-combustión con amoníaco verde permite disminuir las emisiones de ciclo de vida respecto de una central que utiliza únicamente carbón, mientras que el beneficio puede reducirse considerablemente cuando el amoníaco proviene de procesos de mayor intensidad de carbono (Sun et al., 2023). Por esta razón, el desempeño ambiental de la reconversión no depende únicamente de las emisiones generadas dentro de Guacolda, sino también de la forma en que se produce y suministra el nuevo combustible.

A partir de estos antecedentes, se establece una preferencia muy fuerte del cierre frente a la reconversión, correspondiente al valor 7 de la escala presentada en la Tabla 3. La diferencia se considera mayor que en los criterios anteriores debido a que el cierre elimina la fuente permanente de emisiones operacionales asociadas al carbón, mientras que la reconversión evaluada conserva un 50 % de este combustible. No obstante, no se asigna una valoración extrema, ya que la alternativa de reconversión logra una reducción importante de las emisiones de CO_2 respecto de la operación actual y puede disminuir aún más su impacto cuando el amoníaco utilizado presenta una baja huella de carbono.

Considerando el cierre definitivo en la primera fila y la reconversión en la segunda, la matriz de comparación queda definida mediante la Ecuación 45:

$$M_6 = \begin{pmatrix} 1 & 7 \\ \frac{1}{7} & 1 \end{pmatrix}. \quad (45)$$

A partir de su normalización se obtiene el vector de prioridades locales, según la Ecuación 46:

$$R_6 = \begin{pmatrix} 0{,}8750 \\ 0{,}1250 \end{pmatrix}. \quad (46)$$

Por lo tanto, respecto de las emisiones de gases de efecto invernadero, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A6} = 87{,}50\ \%$, mientras que la reconversión alcanza un $r_{B6} = 12{,}50\ \%$.

C7. Calidad del aire e impacto en la salud

Para la calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7), el cierre definitivo presenta una ventaja frente a la reconversión, debido a que elimina las emisiones operacionales de contaminantes atmosféricos generadas por la combustión en Guacolda. Entre los principales contaminantes asociados a la operación termoeléctrica se encuentran el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NOx) y el material particulado, los cuales afectan la calidad del aire y pueden aumentar la exposición de la población a sustancias asociadas con efectos respiratorios y cardiovasculares. Por esta razón, la comparación entre ambas alternativas no se limita a observar cuánto disminuyen las emisiones, sino también en qué medida cada opción permite reducir la exposición de la población local y mejorar las condiciones ambientales del territorio.

En el escenario de cierre, las emisiones operacionales provenientes de la combustión de Guacolda dejan de generarse. Esto no significa que desaparezca toda la contaminación atmosférica de Huasco, ya que existen otras fuentes emisoras en el

territorio, pero sí se elimina el aporte asociado directamente a la operación de la central. Desde la perspectiva de este criterio, esta alternativa presenta una ventaja clara al reducir de manera permanente una fuente de exposición a contaminantes locales.

La reconversión también puede producir mejoras en la calidad del aire, aunque sus efectos dependen del comportamiento de cada contaminante. En la demostración realizada en la Central Hekinan con una sustitución de 20 % de amoníaco, las emisiones de SOx disminuyeron aproximadamente un 20 %, mientras que los niveles de NOx se mantuvieron iguales o inferiores a los registrados durante la operación exclusiva con carbón (JERA, 2024). Estos resultados muestran que la reducción del uso de carbón puede disminuir determinados contaminantes sin necesidad de detener completamente la operación de la central.

Sin embargo, el comportamiento observado con una participación de 20 % de amoníaco no permite asumir el mismo resultado para una configuración de 50 %, como la considerada en Guacolda. La formación de NOx depende de factores como la proporción de amoníaco, las condiciones de combustión, el sistema de inyección y las estrategias de control utilizadas. Lee et al. (2023) indican que, en términos generales, las emisiones de NOx tienden a aumentar a medida que crece la participación de amoníaco, salvo bajo determinadas condiciones operacionales y medidas específicas de control. Por lo tanto, aunque una menor utilización de carbón puede favorecer la reducción de algunos contaminantes, no es posible asumir que existe una mejora proporcional de todos los componentes que determinan la calidad del aire.

Esta diferencia adquiere especial relevancia en Huasco, donde existen antecedentes que evidencian una mayor incidencia de enfermedades respiratorias en la población (Viviani et al., 2021). Si bien estos resultados no permiten establecer una

relación causal directa con Guacolda, respaldan la importancia de considerar los efectos potenciales de la calidad ambiental sobre la salud de la población local.

En este contexto, la reconversión puede disminuir parte de la carga contaminante asociada al uso de carbón, pero mantiene una operación de combustión y, por lo tanto, no elimina completamente la exposición de la población a emisiones provenientes de la central. El cierre, en cambio, elimina esta fuente operacional de contaminantes locales. Por esta razón, desde una perspectiva centrada en la calidad del aire y la protección de la salud de la población, el cierre presenta un desempeño claramente favorable.

A partir de estos antecedentes, se establece una preferencia del cierre frente a la reconversión correspondiente al valor 6 de la escala presentada en la Tabla 3, es decir, una intensidad intermedia entre una preferencia fuerte y muy fuerte. No se asigna un valor 7 o superior debido a que la reconversión también puede generar mejoras relevantes en la calidad del aire al reducir el uso de carbón y disminuir determinados contaminantes, especialmente SOx. Sin embargo, la permanencia de emisiones operacionales y la mayor incertidumbre respecto del comportamiento de los NOx en una configuración con una participación más elevada de amoníaco justifican mantener una ventaja clara para el cierre.

Considerando el cierre definitivo en la primera fila y la reconversión en la segunda, la matriz de comparación queda definida mediante la Ecuación 47:

$$M_7 = \begin{pmatrix} 1 & 6 \\ \frac{1}{6} & 1 \end{pmatrix}. \tag{47}$$

A partir de su normalización se obtiene el vector de prioridades locales. (Ecuación 48).

$$R_7 = \begin{pmatrix} 0{,}8571 \\ 0{,}1429 \end{pmatrix}. \tag{48}$$

Por lo tanto, respecto de la calidad ambiental y efectos sobre la salud, el cierre obtiene una prioridad local de $r_{A7} = 85{,}71\ \%$, mientras que la reconversión alcanza un $r_{B7} = 14{,}29\ \%$.

En conjunto, todas las comparaciones realizadas permiten obtener los resultados de las prioridades locales del cierre y reconversión para cada criterio.

10.4. Priorización global de las alternativas

Antes de obtener la priorización final de las alternativas, se resumen las ponderaciones de los siete criterios y las prioridades locales obtenidas por el cierre definitivo y la reconversión en cada uno de ellos. Estos valores corresponden a los resultados desarrollados en los apartados anteriores y constituyen la información que se utiliza posteriormente para calcular la contribución de cada criterio al resultado global.

Tabla 12. Ponderaciones de los criterios y prioridades locales obtenidas para cada alternativa.

Criterio	Ponderación (p_i)	Cierre definitivo (r_{Ai})	Reconversión (r_{Bi})
C1	24,97 %	66,67 %	33,33 %
C2	15,50 %	33,33 %	66,67 %
C3	6,38 %	16,67 %	83,33 %
C4	22,86 %	16,67 %	83,33 %
C5	5,57 %	16,67 %	83,33 %
C6	16,44 %	87,50 %	12,50 %
C7	8,27 %	85,71 %	14,29 %

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior, permite observar que ambas alternativas presentan ventajas en criterios distintos. El cierre definitivo obtiene una mayor prioridad local en inversión requerida (C1), emisiones de GEI (C6) calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7). Por su parte, la reconversión presenta una mayor prioridad en sostenibilidad económica de la alternativa (C2), infraestructura, desmantelamiento y reutilización (C3), impacto socioeconómico local (C4) y reconversión laboral (C5). Sin embargo, el hecho de que una alternativa sea preferida en un mayor número de criterios no determina directamente el resultado final, ya que cada uno posee una ponderación diferente dentro de la evaluación.

A partir de los valores presentados en la tabla, se obtienen las prioridades globales de ambas alternativas. Para ello, se utilizan las ponderaciones p_i de los siete criterios y las prioridades locales r_{Ai} y r_{Bi} obtenidas previamente para el cierre definitivo y la reconversión. La contribución de cada criterio se obtiene multiplicando su ponderación por la prioridad local correspondiente a cada alternativa. Posteriormente, estas contribuciones se suman para los siete criterios considerados.

Para la alternativa A, correspondiente al cierre definitivo, la prioridad global se determina con los valores obtenidos en cada criterio para esta alternativa mediante la Ecuación 49:

$$G_A = (0{,}2497 \cdot 0{,}6667) + (0{,}1550 \cdot 0{,}3333) + (0{,}0638 \cdot 0{,}1667) + (0{,}2286 \cdot 0{,}1667) + (0{,}0557 \cdot 0{,}1667) + (01644 \cdot 0{,}8750) + (0{,}0827 \cdot 0{,}8571) = 0{,}4909 \quad (49)$$

De esta manera, la prioridad global es de aproximadamente 49,09 % para el cierre definitivo.

Para la alternativa B, correspondiente a la reconversión, se aplica el mismo procedimiento, obteniendo la Ecuación 50:

$$G_B = (0{,}2497 \cdot 0{,}3333) + (0{,}1550 \cdot 0{,}6667) + (0{,}0638 \cdot 0{,}8333) + (0{,}2286 \cdot 0{,}8333) + (0{,}0557 \cdot 0{,}8333) + (0{,}1644 \cdot 0{,}1250) + (0{,}0827 \cdot 0{,}1429) = 0{,}5090 \quad (50)$$

Por lo tanto, la prioridad global es aproximadamente 50,90 % para la reconversión.

La contribución individual de cada criterio y el resultado global de ambas alternativas se presentan de manera resumida en la Tabla 13.

Tabla 13. Contribución ponderada de cada criterio y prioridad global de las alternativas.

Criterio	Cierre definitivo (G_A)	Reconversión (G_B)
C1	16,65 %	8,32 %
C2	5,17 %	10,33 %
C3	1,06 %	5,32 %
C4	3,81 %	19,05 %
C5	0,93 %	4,64 %
C6	14,38 %	2,06 %
C7	7,09 %	1,18 %
Prioridad Global	**49,09%**	**50,90%**

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos muestran que las prioridades globales de ambas alternativas son muy cercanas. La diferencia entre ellas alcanza aproximadamente 1,81 puntos porcentuales, con una prioridad ligeramente superior para la reconversión.

10.5. Análisis de sensibilidad

Los resultados obtenidos en la priorización global muestran una diferencia reducida entre ambas alternativas. Esta cercanía indica que la priorización obtenida puede verse afectada por variaciones en las ponderaciones de los criterios o por cambios en las condiciones bajo las cuales se evalúan las alternativas. Por esta razón, se desarrolla un análisis de sensibilidad orientado a determinar qué tan estable es el resultado frente a modificaciones en los principales elementos que intervienen en la evaluación.

10.5.1. Sensibilidad de las ponderaciones de los criterios

En primer lugar, se analiza el efecto que produce variaciones en las ponderaciones p_i de los criterios, manteniendo constantes las prioridades locales obtenidas para las alternativas: cierre definitivo y reconversión. Cada vez que se modifica la ponderación de un criterio, las ponderaciones restantes se ajustan proporcionalmente para conservar una suma total igual a 1. De esta manera, es posible observar qué criterios presentan una mayor capacidad para modificar la priorización global obtenida en el escenario base.

Para cada criterio seleccionado se modifica individualmente su ponderación en −20 %, −10 %, +10 % y +20 %. En cada escenario, las ponderaciones de los seis criterios restantes se reajustan proporcionalmente para mantener una suma total igual a 1, mientras que las prioridades locales de las alternativas permanecen constantes. Posteriormente, se recalculan las prioridades globales G_A y G_B.

Para esto, se seleccionan los tres criterios con mayor ponderación dentro del modelo: inversión requerida (C1), con 24,97 %; impacto socioeconómico local (C4), con 22,86 %; y emisiones de GEI (C6), con 16,44 %. La selección resulta especialmente relevante debido a que estos tres criterios concentran conjuntamente

64,27 % de la ponderación total, por lo que presentan una mayor capacidad de modificar las prioridades globales ante cambios en su importancia relativa. Además, permiten incorporar dentro del análisis criterios vinculados respectivamente con los aspectos económico, social y ambiental considerados en la evaluación.

C1. Inversión requerida

En primer lugar, se analiza la sensibilidad de la ponderación correspondiente a inversión requerida (C1), debido a que presenta el mayor peso dentro del modelo, con una ponderación inicial de $p_1 = 0{,}2497$.

Aplicando las variaciones definidas, la ponderación de C1 adopta los siguientes valores para los distintos escenarios. (Ecuación 51, 52, 53 y 54).

$$p'_1(-20\%) = 0{,}2497(0{,}80) = 0{,}1998 \quad (51)$$

$$p'_1(-10\%) = 0{,}2497(0{,}90) = 0{,}2247 \quad (52)$$

$$p'_1(+10\%) = 0{,}2497(1{,}10) = 0{,}2747 \quad (53)$$

$$p'_1(+20\%) = 0{,}2497(1{,}20) = 0{,}2996 \quad (54)$$

En cada escenario, las ponderaciones de los seis criterios restantes se reajustan proporcionalmente.

Por ejemplo, para el escenario en que la ponderación de C1 aumenta un 20%, el nuevo valor corresponde a $p'_1 = 0{,}2996$. Como la suma de todas las ponderaciones debe mantenerse igual a 1, el aumento de C1 reduce la participación disponible para los seis criterios restantes. Por esta razón, primero se determina el factor de reajuste proporcional (Ecuación 55).

$$\frac{1-p'_1}{1-p_1} = \frac{1-0{,}2996}{1-0{,}2497} = 0{,}9334\ . \quad (55)$$

Este valor indica que cada uno de los criterios restantes conserva aproximadamente el 93,34 % de su ponderación original, permitiendo mantener entre ellos la misma relación relativa existente en el escenario base.

Una vez obtenido este factor, se aplica a las ponderaciones originales de los seis criterios que no fueron modificados. De esta forma, cada ponderación se multiplica por $0{,}9334$ para este escenario, permitiendo reducirlas en la misma proporción y mantener la relación existente entre ellas. Así, mientras C1 aumenta su ponderación hasta $p'_1 = 0{,}2996$, los nuevos valores para el resto de los criterios corresponden aproximadamente a: $p'_2 = 0{,}1447$, $p'_3 = 0{,}0596$, $p'_4 = 0{,}2134$, $p'_5 = 0{,}0520$, $p'_6 = 0{,}1535$ y $p'_7 = 0{,}0772$.

Lo anterior, se puede expresar como el nuevo vector de ponderaciones P', para el escenario de aumento de 20 % en C1, representado en la Ecuación 56:

$$P'(+20\%) = \begin{pmatrix} 0{,}2996 \\ 0{,}1447 \\ 0{,}0596 \\ 0{,}2134 \\ 0{,}0520 \\ 0{,}1535 \\ 0{,}0772 \end{pmatrix} . \tag{56}$$

En conjunto, estas nuevas ponderaciones mantienen una suma igual a 1, permitiendo continuar con el cálculo de las prioridades globales de ambas alternativas.

Manteniendo constantes las prioridades locales de ambas alternativas y utilizando estas nuevas ponderaciones, según la Ecuación 57 y 58.

$$G'_A = 0{,}5026 \tag{57}$$

$$G'_B = 0{,}4974 \tag{58}$$

Por lo tanto, los resultados muestran que un aumento de 20 % en la ponderación de inversión requerida (C1) modifica la priorización obtenida en el escenario base. Bajo esta variación, el cierre definitivo alcanza una prioridad global

de 50,26 %, mientras que la reconversión disminuye a 49,74 %, invirtiéndose el orden inicial de preferencia. Esto evidencia que el resultado es sensible a cambios en la importancia asignada a C1, ya que una modificación relativamente acotada en su ponderación es suficiente para alterar la alternativa con mayor prioridad global.

El mismo procedimiento se aplica a las restantes variaciones definidas para C1, correspondientes a −20 %, −10 % y +10 % respecto de su ponderación original. Para cada escenario se calcula la nueva ponderación, se reajustan proporcionalmente los pesos de los seis criterios restantes y, posteriormente, se recalculan las prioridades globales del cierre definitivo y de la reconversión. Los resultados obtenidos para las distintas variaciones de la ponderación de C1 se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Sensibilidad de las prioridades globales ante variaciones en ponderación C1.

Variación C1	Nuevo p'_1	Factor reajuste	Cierre	Reconversión
−20 %	19,98 %	1,0666	47,92 %	52,08 %
−10 %	22,47 %	1,0333	48,51 %	51,49 %
Base	24,97 %	—	49,09 %	50,90 %
+10 %	27,47 %	0,9667	49,68 %	50,32 %
+20 %	29,96 %	0,9334	50,26 %	49,74 %

Fuente: Elaboración propia.

De los cuatro escenarios evaluados, solo el aumento de 20 % en la ponderación de inversión requerida (C1) modifica el orden de preferencia entre las alternativas. En los tres escenarios restantes, las prioridades globales cambian respecto del escenario base, pero la reconversión mantiene la mayor valoración. Al disminuir la ponderación de C1 en un 20 %, la diferencia se amplía de manera importante a favor de la reconversión, alcanzando una ventaja de 4,16 puntos porcentuales sobre el cierre. En cambio, cuando la ponderación de C1 aumenta un 20 %, el cierre pasa a ocupar la primera posición, aunque con una diferencia considerablemente menor, de solo 0,52 puntos porcentuales. Esta diferencia muestra que una menor importancia de

la inversión requerida fortalece de forma más marcada la posición de la reconversión, mientras que una mayor importancia de este criterio logra favorecer al cierre, pero sin generar una ventaja amplia. Esto ocurre porque, al disminuir el peso de C1, aumenta proporcionalmente la participación de los demás criterios, varios de los cuales favorecen a la reconversión; por el contrario, al aumentar C1, su efecto favorable al cierre debe compensar la ventaja que la reconversión mantiene en otros criterios. En consecuencia, C1 presenta capacidad para modificar la priorización, pero incluso en el escenario más favorable al cierre evaluado, el resultado continúa siendo estrecho.

C4. Impacto socioeconómico local

El mismo procedimiento se aplica a impacto socioeconómico local (C4), cuya ponderación inicial corresponde a $p'_4 = 0{,}2286$. A diferencia del caso desarrollado para C1, los cálculos se presentan de manera resumida, dado que el procedimiento de modificación y reajuste proporcional de las ponderaciones es equivalente. Los resultados obtenidos para las variaciones de -20%, -10%, $+10\%$ y $+20\%$ en la ponderación de C4 se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Sensibilidad de las prioridades globales ante variaciones en ponderación C4.

Variación C4	Nuevo p'_4	Factor reajuste	Cierre	Reconversión
−20 %	18,29 %	1,0593	51,01 %	48,98 %
−10 %	20,57 %	1,0296	50,05 %	49,94 %
Base	22,86 %	—	49,09 %	50,90 %
+10 %	25,15 %	0,9704	48,13 %	51,86 %
+20 %	27,43 %	0,9407	47,17 %	52,82 %

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 muestra que el resultado presenta una sensibilidad relevante frente a cambios en la ponderación de impacto socioeconómico local (C4). De los escenarios evaluados, una disminución de 10 % en su ponderación ya es suficiente para

modificar el orden de preferencia, aunque por un margen reducido: el cierre alcanza 50,05 %, frente a 49,94 % de la reconversión, correspondiente a una diferencia de solo 0,11 puntos porcentuales. Al disminuir C4 en 20 %, esta diferencia aumenta hasta aproximadamente 2,03 puntos porcentuales a favor del cierre. En sentido contrario, aumentar la ponderación de C4 fortalece progresivamente la reconversión, alcanzando una ventaja de aproximadamente 5,65 puntos porcentuales en el escenario de +20 %. Esto evidencia que C4 tiene una incidencia importante sobre la estabilidad del resultado: dado que este criterio favorece ampliamente a la reconversión, reducir su importancia debilita una de sus principales ventajas dentro de la evaluación, mientras que aumentarla amplía de manera clara su diferencia respecto del cierre. En comparación con C1, además, se observa que una variación menor es suficiente para modificar la alternativa con mayor prioridad global.

C6. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Finalmente, el mismo procedimiento se aplica al criterio emisiones de GEI (C6), cuya ponderación inicial corresponde a $p'_6 = 0{,}1644$. Debido a que el procedimiento de cálculo y reajuste proporcional ya fue desarrollado para C1, en este caso se presentan directamente los resultados obtenidos para las variaciones de -20%, -10%, $+10\%$ y $+20\%$, resumidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Sensibilidad de las prioridades globales ante variaciones en ponderación C6.

Variación C6	Nuevo p'_6	Factor reajuste	Cierre	Reconversión
−20 %	13,15 %	1,0393	47,58 %	52,42 %
−10 %	14,80 %	1,0197	48,34 %	51,66 %
Base	16,44 %	—	49,09 %	50,90 %
+10 %	18,08 %	0,9803	49,85 %	50,15 %
+20 %	19,73 %	0,9607	50,60 %	49,40 %

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que, en tres de los cuatro escenarios evaluados, la reconversión mantiene la mayor prioridad global. Solo cuando la ponderación de emisiones de GEI (C6) aumenta en 20 % se produce un cambio en el orden de preferencia, pasando el cierre definitivo a superar a la reconversión por aproximadamente 1,20 puntos porcentuales. En el extremo contrario, una disminución de 20 % en C6 amplía la diferencia a favor de la reconversión hasta aproximadamente 4,84 puntos porcentuales sobre el cierre. Esto indica que el resultado es sensible a aumentos importantes en la relevancia de las emisiones de GEI, aunque incluso en el escenario favorable al cierre la diferencia continúa siendo reducida. En cambio, cuando este criterio pierde importancia, la ventaja de la reconversión se amplía de manera más marcada.

En conjunto, los tres criterios seleccionados permiten observar cómo cambia la priorización frente a variaciones en factores asociados a los aspectos económico, social y ambiental de la evaluación. Una mayor importancia de inversión requerida (C1) o de emisiones de GEI (C6) tiende a favorecer al cierre definitivo, mientras que una mayor importancia del impacto socioeconómico local (C4) fortalece la posición de la reconversión. Sin embargo, la magnitud de estos efectos no es equivalente. El aumento de 20 % en C1 y C6 permite que el cierre supere a la reconversión, aunque por diferencias reducidas, mientras que un aumento de 20 % en C4 genera una ventaja considerablemente mayor a favor de la reconversión. De esta forma, el análisis muestra que cambios en la importancia relativa de factores económicos, sociales o ambientales pueden modificar el resultado, pero con distinta intensidad según el criterio considerado.

10.5.2. Sensibilidad del desempeño de las alternativas

Este segundo análisis de sensibilidad evalúa cómo puede cambiar la priorización global cuando se modifican las condiciones que determinan el desempeño relativo del cierre definitivo y la reconversión. A diferencia del análisis anterior, las ponderaciones de los criterios p_i se mantienen constantes y lo que se modifica es la evaluación de las alternativas dentro de determinados criterios. Con ello, se busca determinar si cambios plausibles en el contexto podrían fortalecer, reducir o incluso invertir las ventajas observadas en el escenario base.

Para este análisis se seleccionan sostenibilidad económica de la alternativa (C2), impacto socioeconómico local (C4) y calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7). La selección responde a que el desempeño relativo de ambas alternativas en estos criterios podría modificarse ante cambios futuros en variables relevantes. En C2, factores como el precio, la disponibilidad y la confiabilidad del suministro de amoníaco verde pueden alterar la sostenibilidad económica de la reconversión. En C4, la evolución del empleo y la diversificación económica de Huasco pueden modificar la magnitud del impacto asociado al cierre. En C7, los avances en tecnologías de control de emisiones pueden cambiar el desempeño ambiental de la reconversión.

Para cada criterio se plantean escenarios plausibles que modifican la valoración relativa entre el cierre y la reconversión. A partir de cada nueva valoración se reconstruye la matriz de comparación 2×2, se obtienen las nuevas prioridades locales y, manteniendo constantes las ponderaciones p_i, se recalculan las prioridades globales G_A y G_B. De esta forma, se puede observar cuánto cambia el resultado final cuando varían las condiciones que sustentan la evaluación original.

C2. Sostenibilidad económica de la alternativa

En el escenario base, la reconversión presenta una preferencia ligera frente al cierre definitivo, representada mediante un valor 2 en la escala de Saaty. Para el análisis de sensibilidad se consideran dos situaciones que podrían modificar esta relación: una reducción significativa en el costo del amoníaco verde y, en sentido contrario, la permanencia de costos elevados del combustible.

- Escenario 1: Disminución de costo del amoniaco verde

La reducción futura del costo del amoníaco verde constituye un escenario plausible para Chile. El Ministerio de Energía identifica condiciones favorables para el desarrollo competitivo del hidrógeno verde y sus derivados, especialmente en zonas con alta disponibilidad de recursos renovables (Ministerio de Energía de Chile, 2020). Además, se estima que el costo de producción del hidrógeno verde podría disminuir desde aproximadamente USD 4 a 5,5/kg H_2 hasta USD 1,5 a 2,5/kg H_2 hacia 2030, mientras que el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023 - 2030 incorpora medidas regulatorias, financieras y productivas orientadas al desarrollo de esta industria (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Bajo estas condiciones, se considera una mejora en la sostenibilidad económica de la reconversión, aumentando su preferencia frente al cierre desde un valor Saaty de 2 a 3. No se asigna una intensidad mayor debido a que aún existen incertidumbres asociadas a la disponibilidad, comercialización y cadena de suministro del amoníaco verde.

La nueva matriz de comparación queda definida mediante la Ecuación 59:

$$M'_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}, \tag{59}$$

obteniéndose como resultado para cada alternativa, la Ecuación 60:

$$R'_2 = \begin{pmatrix} 0{,}25 \\ 0{,}75 \end{pmatrix}. \tag{60}$$

Manteniendo constante la ponderación de C2 y los resultados de los demás criterios, las prioridades globales pasan a $G'_A = 47{,}80\ \%$ para el cierre y $G'_B = 52{,}20\ \%$ para la reconversión. Con ello, la ventaja de la reconversión aumenta respecto del escenario base.

- Escenario 2: Permanencia de costos elevados del amoniaco verde

A pesar de las reducciones de costos proyectadas, todavía existe incertidumbre respecto de la competitividad económica del amoníaco verde. La nueva Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde plantea que la competitividad del hidrógeno y sus derivados se alcanzaría de manera gradual hacia el mediano y largo plazo, mientras que la IEA señala que el amoníaco de bajas emisiones podría continuar siendo más costoso que el carbón y el gas natural para generación eléctrica incluso hacia 2030 (Ministerio de Energía de Chile, 2026; IEA, 2021).

Bajo este escenario, se considera que la ventaja económica de la reconversión disminuye, pasando de una preferencia Saaty de 2 a 1, es decir, ambas alternativas presentan igual valoración en C2 (Ecuación 61).

$$M''_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \tag{61}$$

obteniendo así la Ecuación 62:

$$R''_2 = \begin{pmatrix} 0{,}50 \\ 0{,}50 \end{pmatrix}. \tag{62}$$

Manteniendo constante la ponderación de C2 y los demás resultados, las prioridades globales pasan aproximadamente a $G''_A = 51{,}67\ \%$ para el cierre y $G''_B = 48{,}33\ \%$ para la reconversión. En este escenario, la pérdida de la ventaja económica de la reconversión es suficiente para invertir la priorización obtenida inicialmente.

C4. Impacto socioeconómico local

En el escenario base, la reconversión presenta una preferencia fuerte frente al cierre definitivo en C4, representada mediante un valor Saaty de 5. Para el análisis de sensibilidad se consideran dos escenarios que podrían modificar esta diferencia.

- Escenario 1: Mayor dificultad del mercado laboral local

Un deterioro del empleo en la Región de Atacama o una mayor dependencia de Huasco respecto de las actividades vinculadas a Guacolda podría aumentar el impacto socioeconómico asociado al cierre. El estudio desarrollado para el Ministerio de Energía identifica dificultades de reinserción y la necesidad de capacitación y diversificación productiva ante una eventual transición laboral en Huasco. Además, la tasa de desocupación de Atacama alcanzó 9,1 % durante el trimestre mayo-julio de 2026 (Ministerio de Energía de Chile, 2024; INE, 2026).

Bajo este escenario, se aumenta la preferencia de la reconversión desde un valor Saaty de 5 a 7, correspondiente a una preferencia muy fuerte (Ecuación 63).

$$M'_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{7} \\ 7 & 1 \end{pmatrix}, \tag{63}$$

obteniéndose así la Ecuación 64:

$$R'_4 = \begin{pmatrix} 0{,}125 \\ 0{,}875 \end{pmatrix}. \tag{64}$$

Manteniendo constante la ponderación de C4 y los demás resultados, las prioridades globales pasan aproximadamente a $G'_A = 48{,}14\%$ para el cierre y $G'_B = 51{,}85\%$ para la reconversión, aumentando su ventaja respecto del escenario base.

- Escenario 2: Mayor diversificación y disponibilidad de empleo

En sentido contrario, la ventaja socioeconómica de la reconversión podría disminuir si Huasco desarrolla nuevas fuentes de actividad y empleo. El diagnóstico elaborado para la comuna identifica oportunidades en sectores como energías renovables, turismo, agricultura, pesca, minería y emprendimiento, señalando la

diversificación de la matriz productiva como una posibilidad para reducir la dependencia de las actividades actuales (Ministerio de Energía de Chile, 2024).

Bajo este escenario, la preferencia de la reconversión se reduce desde Saaty 5 a 3. La nueva matriz se representa mediante la Ecuación 65:

$$M''_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}, \tag{65}$$

obteniendo también la Ecuación 66:

$$R''_4 = \begin{pmatrix} 0{,}25 \\ 0{,}75 \end{pmatrix}. \tag{66}$$

Manteniendo constante la ponderación de C4 y los resultados de los demás criterios, las prioridades globales pasan aproximadamente a $G''_A = 51{,}00\ \%$ para el cierre y $G''_B = 49{,}00\ \%$ para la reconversión. Por lo tanto, una reducción de la ventaja socioeconómica de la reconversión desde una preferencia fuerte a moderada es suficiente para invertir la priorización obtenida en el escenario base.

Esto muestra que el resultado presenta una sensibilidad importante frente a cambios en las condiciones socioeconómicas locales, especialmente si disminuye la dependencia de Huasco respecto de la actividad asociada a Guacolda.

C7. Calidad ambiental y efectos sobre la salud

En el escenario base, el cierre presenta una preferencia importante frente a la reconversión, representada mediante un valor Saaty de 6. Para el análisis de sensibilidad se consideran dos escenarios asociados a la evolución del control de contaminantes atmosféricos.

- Escenario 1: Mejora en el control de emisiones de la reconversión

Los resultados obtenidos en la Central Hekinan muestran que, con una sustitución de 20 % de amoníaco, las emisiones de NOx se mantuvieron iguales o inferiores a la operación exclusiva con carbón, mientras que las emisiones de SOx

disminuyeron aproximadamente un 20 % (JERA, 2024). Además, IHI continúa desarrollando tecnologías para aumentar la proporción de amoníaco por sobre 50 %, incluyendo mejoras en los sistemas de combustión y control de emisiones.

Bajo un escenario donde estas mejoras tecnológicas permitan reducir de manera más efectiva los contaminantes locales, se disminuye la ventaja del cierre desde un valor Saaty de 6 a 4. Esto queda expresado en la Ecuación 67:

$$M'_7 = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ \frac{1}{4} & 1 \end{pmatrix}, \tag{67}$$

obteniéndose así, el valor R'_7 en la Ecuación 68:

$$R'_7 = \begin{pmatrix} 0{,}80 \\ 0{,}20 \end{pmatrix}. \tag{68}$$

Manteniendo constantes los demás resultados, las prioridades globales pasan aproximadamente a $G'_A = 48{,}62\,\%$ para el cierre y $G'_B = 51{,}38\,\%$ para la reconversión, aumentando la ventaja de esta última.

- Escenario 2: Mayores dificultades para controlar Nox

En sentido contrario, una mayor participación de amoníaco puede generar mayores desafíos para controlar las emisiones de NOx. Lee et al. (2023) señalan que, en general, las emisiones de NOx tienden a aumentar a medida que se incrementa la proporción de amoníaco, salvo bajo determinadas condiciones de operación y control. Además, estudios muestran que variables como la temperatura y la proporción de mezcla influyen directamente en la formación de NOx durante la co-combustión de carbón y amoníaco (Lee et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Bajo estas condiciones, en las que no se logra controlar adecuadamente la formación de contaminantes ni las condiciones de combustión dentro de la planta, el desempeño de la reconversión en C7 se vuelve menos favorable. Por esta razón, para el análisis de sensibilidad se aumenta la preferencia del cierre desde un valor Saaty de 6 a 7, correspondiente a una preferencia muy fuerte (Ecuación 69).

$$M''_7 = \begin{pmatrix} 1 & 7 \\ \frac{1}{7} & 1 \end{pmatrix}, \tag{69}$$

obteniéndose así, la Ecuación 70:

$$R''_7 = \begin{pmatrix} 0{,}875 \\ 0{,}125 \end{pmatrix}. \tag{70}$$

Las prioridades globales pasan aproximadamente a $G''_A = 49{,}24\ \%$ para el cierre y $G''_B = 50{,}75\ \%$ para la reconversión. Por lo tanto, aunque empeore el desempeño de la reconversión en este criterio, el cambio no alcanza por sí solo a invertir la priorización global, principalmente debido a la menor ponderación relativa de C7 dentro del modelo.

En conjunto, los escenarios analizados muestran que la priorización global responde de manera distinta según el criterio considerado. En sostenibilidad económica de la alternativa (C2), una mejora en las condiciones de la reconversión aumenta su ventaja, mientras que la pérdida de esta permite que el cierre pase a ocupar la primera posición. En impacto socioeconómico local (C4) ocurre algo similar: al reducirse la ventaja de la reconversión, el orden de preferencia también puede invertirse. En cambio, las variaciones evaluadas en calidad ambiental y efectos sobre la salud (C7) modifican la diferencia entre ambas alternativas, pero no alcanzan a cambiar la priorización global. Esto se relaciona con su menor ponderación dentro de la jerarquía de criterios, correspondiente a 8,27 %, por lo que las modificaciones en sus prioridades locales tienen una incidencia más limitada sobre el resultado final. En comparación, C2 y C4 poseen ponderaciones de 15,50 % y 22,86 %, respectivamente, por lo que cambios en su desempeño generan efectos de mayor magnitud. En consecuencia, los resultados muestran que el impacto de una modificación no depende únicamente de cuánto cambia la valoración de las alternativas dentro de un criterio, sino también del peso que dicho criterio posee en el modelo AHP.

10.6. Discusión de los resultados

En cuanto a la jerarquización, los resultados muestran que la evaluación no queda concentrada en un único tipo de criterios. C1, C4 y C6 reúnen la mayor parte de la ponderación, con más del 64% del peso total del modelo, y representan, respectivamente, aspectos económicos, sociales y ambientales. Esto permite interpretar que la estructura del modelo es relativamente equilibrada, ya que la decisión no depende exclusivamente la inversión, aspectos sociales, ni exclusivamente de los efectos ambientales, sino una mezcla de ellos. La cercanía entre C1 y C4 es particularmente relevante, porque muestra que la factibilidad económica de implementar una alternativa y sus consecuencias sobre el empleo directo e indirecto en el entorno local adquieren una importancia prácticamente equivalente dentro de la evaluación, bajo este contexto.

Al mismo tiempo, la diferencia entre los criterios de mayor y menor ponderación permite distinguir cuáles tienen mayor capacidad para definir el resultado global y cuáles cumplen un papel más complementario. Que C3 o C5 presenten menores pesos no significa que sus efectos sean irrelevantes, sino que una ventaja importante en estos criterios tiene menor capacidad para compensar una desventaja en C1, C4 o C6. Por lo tanto, la jerarquía obtenida no solo ordena los criterios, sino que permite comprender posteriormente por qué determinadas fortalezas de cada alternativa tienen una incidencia distinta sobre el resultado final.

Las matrices 2×2 permiten observar justamente esta diferencia. El cierre presenta sus principales ventajas en C1, C6 y C7, mientras que la reconversión obtiene una valoración superior en C2, C3, C4 y C5. Sin embargo, el hecho de que la reconversión sea favorecida en un mayor número de criterios no determina por sí solo el resultado. Lo relevante es la combinación entre la intensidad de cada preferencia local y la ponderación del criterio en que esta se produce. En particular, la fuerte

ventaja de la reconversión en C4 adquiere una incidencia considerable por tratarse del segundo criterio con mayor peso, mientras que las ventajas del cierre en C1 y C6 permiten contrarrestar gran parte de ese efecto. Por lo tanto, el resultado global no refleja una superioridad general de una sobre la otra, sino una compensación entre fortalezas distintas: el cierre concentra ventajas en criterios de alta importancia asociados principalmente a inversión y emisiones, mientras que la reconversión combina una ventaja social relevante con beneficios en otros criterios económicos y asociados al aprovechamiento de la infraestructura.

La priorización global obtenida, con 50,90 % para la reconversión y 49,09 % para el cierre, con una diferencia de 1,81 puntos porcentuales, confirma que las ventajas identificadas previamente tienden a compensarse entre sí. La diferencia final es reducida, por lo que el resultado debe interpretarse más como un equilibrio entre fortalezas económicas, sociales y ambientales, que como una superioridad amplia de una alternativa sobre la otra.

El análisis de sensibilidad de las ponderaciones permite profundizar esta interpretación. C4 presenta la mayor capacidad para alterar la priorización, ya que el cambio de alternativa ocurre con una reducción de su ponderación ubicada aproximadamente entre 0 % y 10 % respecto del escenario base. Esto podría darse si Huasco avanzara hacia una mayor diversificación económica y aumentaran las alternativas de empleo y actividad económica local, reduciendo la importancia relativa del impacto socioeconómico asociado al cierre. En C1, el cambio se produce con un aumento ubicado entre 10 % y 20 %, escenario que podría relacionarse con mayores costos de reconversión o condiciones de financiamiento más restrictivas. De manera similar, en C6 la priorización se invierte cuando su ponderación aumenta entre 10 % y 20 %, lo que podría ocurrir ante mayores exigencias climáticas o una regulación más estricta sobre las emisiones de GEI. Si bien no se determina un punto

crítico exacto, estos rangos permiten identificar que C4 es el criterio más sensible, mientras que C1 y C6 requieren modificaciones mayores.

En la sensibilidad del desempeño de las alternativas, los resultados muestran que la priorización también puede modificarse aun cuando las ponderaciones de los criterios se mantengan constantes. Los cambios planteados en C2 y C4 logran invertir el orden entre cierre y reconversión, lo que evidencia que la evolución de variables como el costo del amoníaco verde, la disponibilidad de empleo o la diversificación económica de Huasco puede alterar de manera importante el resultado. En cambio, las variaciones evaluadas en C7 modifican la diferencia entre ambas alternativas, pero no alcanzan a cambiar la priorización global, principalmente por su menor peso dentro del modelo. Esto muestra que no solo importa cuánto cambia el desempeño de una alternativa, sino también la relevancia que posee el criterio en el AHP.

En conjunto, la priorización obtenida depende del equilibrio entre criterios económicos, sociales y ambientales, así como de la evolución de las condiciones consideradas en la evaluación. Los resultados indican una robustez limitada del modelo, ya que la priorización obtenida en el escenario base no se mantiene ante todos los cambios. Por una parte, modificaciones moderadas en la ponderación de algunos criterios relevantes pueden ser suficientes para invertir el orden entre cierre y reconversión. Por otra, cambios en el desempeño de las alternativas dentro de ciertos criterios también pueden modificar el resultado global. Esto no implica que el modelo o la metodología sean deficientes, sino que evidencia que la decisión es sensible tanto a la importancia relativa de los criterios como a la evolución de las condiciones evaluadas, permitiendo identificar con claridad qué elementos tienen mayor capacidad para alterar la priorización.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones generales e implicancias de la evaluación

La evaluación multicriterio desarrollada permite comparar de manera conjunta el cierre definitivo y la reconversión de la Central Termoeléctrica Guacolda, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales. El modelo AHP, evidencia que, dentro de los principales criterios, la inversión requerida (24,97%), el impacto socioeconómico local (22,86%) y las emisiones de GEI (16,44%), obtienen las mayores ponderaciones dentro de la evaluación. Como resultado, la reconversión obtiene una prioridad global de 50,90 %, frente al 49,09 % del cierre. Por lo tanto, la reconversión se posiciona como la alternativa con mayor valoración integral.

La diferencia de 1,81 puntos porcentuales entre las alternativas, evidencia que esta preferencia es estrecha y no representa una superioridad absoluta. El análisis de sensibilidad muestra que cambios en determinadas ponderaciones o desempeño de las alternativas pueden invertir el orden de preferencia. En consecuencia, el resultado debe interpretarse como una priorización asociada a las condiciones consideradas en el estudio y no como una decisión permanente.

Los resultados también muestran que ambas alternativas presentan fortalezas diferentes. El cierre resulta más favorable por requerir una menor inversión inicial y por eliminar las emisiones, generando beneficios climáticos, ambientales y de salud. En contraste, la reconversión permite mantener la operación de Guacolda, aprovechar su infraestructura y reducir los efectos sobre el empleo y la actividad económica de Huasco. Esto evidencia que, ninguno de los ámbitos: económico, social o ambiental, resulta suficiente por sí solo para representar la complejidad de la decisión y refuerza la necesidad de considerar sus efectos de manera conjunta.

Finalmente, se identifican factores que son capaces de modificar la

priorización de las alternativas. Entre ellos destacan la evolución del costo y disponibilidad del amoníaco verde, las condiciones del mercado laboral en Huasco y el desempeño ambiental de la co-combustión. El seguimiento de estos y otros factores influyentes, permitirán determinar cuándo resulta necesario actualizar la evaluación.

11.2. Reconversión, aporte y replicabilidad de la metodología

El caso de Guacolda evidencia cómo el desarrollo tecnológico puede ampliar las alternativas disponibles para las centrales a carbón dentro del proceso de descarbonización. Mientras estudios anteriores consideraban opciones como gas natural, biomasa o almacenamiento térmico, actualmente la co-combustión con amoníaco forma parte de la trayectoria de reconversión planteada para la central. En este contexto, resulta relevante que una tecnología todavía emergente alcance una valoración competitiva frente al cierre cuando se consideran conjuntamente sus efectos económicos, sociales y ambientales.

Sin embargo, este resultado corresponde específicamente a la reconversión analizada para Guacolda. Una reconversión basada en otro combustible o tecnología podría presentar condiciones diferentes de inversión, operación, efectos sociales y ambientales, por lo que requeriría una nueva evaluación ajustada a sus características.

Uno de los principales aportes de esta investigación trasciende el resultado obtenido para la Central Guacolda. El estudio desarrolla una estructura metodológica capaz de ordenar e integrar, dentro de una misma evaluación, los principales aspectos económicos, sociales y ambientales que intervienen en este tipo de decisiones. De esta manera, el valor de la investigación no se limita a determinar qué alternativa presenta una mayor prioridad en el caso analizado, sino que también proporciona una base replicable y adaptable para abordar decisiones similares en el sector energético.

Este aporte adquiere especial relevancia en el contexto del proceso de descarbonización chileno, en el que distintas centrales termoeléctricas deberán enfrentar decisiones asociadas a su retiro o reconversión. La metodología propuesta puede constituir una base para evaluar estos futuros casos, permitiendo mantener una lógica común de análisis y, al mismo tiempo, adaptar los criterios, antecedentes y valoraciones a las características particulares de cada instalación y alternativa tecnológica. Así, la investigación entrega una herramienta que puede contribuir no solo al análisis de Guacolda, sino también a futuras evaluaciones vinculadas con la transformación de otras centrales a carbón en Chile.

11.3. Recomendaciones

Para el caso de Guacolda, se recomienda complementar la evaluación multicriterio con estudios específicos de factibilidad técnica, económica, ambiental y regulatoria antes de adoptar una decisión definitiva de cierre o reconversión. Asimismo, la incorporación de información más directa y la validación de las valoraciones mediante un panel multidisciplinario de expertos permitirían fortalecer el análisis y reducir la incertidumbre asociada a los juicios utilizados en el modelo.

Para futuras aplicaciones, se recomienda utilizar la estructura metodológica desarrollada como base de análisis, pero realizando una nueva evaluación para cada central y alternativa tecnológica. Esto implica ajustar los criterios, antecedentes y valoraciones a las características particulares de cada caso, de modo que la metodología sirva como herramienta de apoyo dentro del proceso de descarbonización chileno y futuros proyectos energéticos.

.

12. LIMITACIONES

Una de las principales limitaciones de la investigación es que la evaluación se construye exclusivamente a partir de fuentes secundarias, como literatura científica, documentos institucionales, estudios técnicos y antecedentes publicados por empresas. Si bien estas fuentes permiten sustentar el análisis, no siempre entregan información suficientemente específica, actualizada o detallada para el caso particular de Guacolda.

Esta menor precisión también influye en la construcción de las valoraciones AHP, ya que los antecedentes disponibles deben ser interpretados y transformados en intensidades de la escala de Saaty. Por ello, las comparaciones utilizadas podrían modificarse si se dispusiera de información más directa y especializada.

Esta limitación podría reducirse mediante la incorporación de un panel multidisciplinario de expertos, con representantes de Guacolda, del Ministerio de Energía, especialistas técnicos y ambientales, y actores con conocimiento del contexto laboral y territorial de Huasco, quienes podrían aportar información específica y validar las valoraciones utilizadas en el modelo.

La priorización obtenida presenta una diferencia reducida entre ambas alternativas y el análisis de sensibilidad demuestra que cambios en determinadas ponderaciones o en el desempeño de los criterios pueden invertir el resultado. Por ello, la preferencia obtenida corresponde a las condiciones evaluadas y no debe interpretarse como un resultado permanente.

Esta limitación adquiere relevancia debido a que variables como el costo y disponibilidad del amoníaco verde, las condiciones económicas, el mercado laboral de Huasco y el desempeño tecnológico y ambiental de la reconversión pueden evolucionar en el tiempo.

Por esta razón, la evaluación debería actualizarse cuando se produzcan

cambios relevantes en estas variables, incorporando nuevos antecedentes y ajustando las ponderaciones o valoraciones del modelo cuando corresponda.

La evaluación se desarrolla específicamente para la Central Termoeléctrica Guacolda y para una reconversión mediante co-combustión de 50 % de amoníaco verde y 50 % de carbón. Por ello, incluso dentro de este caso, la priorización obtenida mediante AHP no debe entenderse como suficiente para definir por sí sola una decisión de cierre o reconversión, sino como un insumo complementario a estudios de factibilidad técnica, económica, ambiental y regulatoria.

Asimismo, los resultados no pueden replicarse directamente en otras centrales ni en alternativas de reconversión basadas en tecnologías o combustibles distintos. Cada nuevo caso requiere una evaluación propia, ajustando los criterios, antecedentes y valoraciones a sus características particulares.

13. REFERENCIAS

Asia-Pacific Economic Cooperation. (2025). *Conversion of coal-fired power plants using energy storage systems*. APEC Energy Working Group. https://www.apec.org/docs/default-source/publications/2025/3/225_ewg-conversion-of-coal-fired-power-plants-using-energy-storage-systems.pdf

Araya Alvarado, T. I. (2024). *Reconversión de centrales termoeléctricas a carbón con distintas alternativas tecnológicas* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/201769/Reconversion-de-centrales-termoelectricas-a-carbon-con-distintas-alternativas-tecnologicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer.

BioBioChile. (2019). *Bocamina I: trabajadores muestran inquietud por impacto social que tendrá cierre de termoeléctrica*. https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2019/06/05/amp/bocamina-i-trabajadores-muestran-inquietud-por-impacto-social-que-tendra-cierre-de-termoelectrica.shtml

Cárcamo, P. F., Cortés, M., Ortega, L., Squeo, F. A., & Gaymer, C. F. (2011). Crónica de un conflicto anunciado: Tres centrales termoeléctricas a carbón en un hotspot de biodiversidad de importancia mundial. *Revista Chilena de Historia Natural, 84*(2), 171–180. https://www.scielo.cl/pdf/rchnat/v84n2/art03.pdf

Carrasco Aguilar, C., Morales Bierschwale, P., & Salazar Fuentes, J. (2015). Representaciones sociales acerca del impacto medioambiental de las empresas termoeléctricas en la bahía de Quintero-Puchuncaví. *Summa Psicológica UST, 12*(1), 89–101.

https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5147352

Castillo, P., Aguad, M., Lorca, Á., Cordova, S., & Negrete-Pincetic, M. (2024). Coal phase-out and carbon tax analysis with long-term planning models: A case study for the Chilean electric power system. *Energies, 17*(21), 5263. https://doi.org/10.3390/en17215263

Centro de Energía, Universidad de Chile. (2023). *Definición y elaboración de metodologías de evaluación social para proyectos asociados a la industria del hidrógeno verde: Informe final*. Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Gobierno de Chile. https://programadps.gob.cl/wp-content/uploads/2025/09/3-Metodologias-de-evaluacion-social-para-proyectos.pdf

Cesaro, Z., Ives, M., Nayak-Luke, R., Mason, M., & Bañares-Alcántara, R. (2021). Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants. *Applied Energy, 282*, 116009. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116009

Chatzimouratidis, A. I., & Pilavachi, P. A. (2009). Sensitivity analysis of technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process. *Energy Policy, 37*(3), 788–798. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.021

Comisión Nacional de Energía. (2024). *Anuario Estadístico de Energía 2024*. Gobierno de Chile. https://www.cne.cl/nuestros-servicios/reportes/informacion-y-estadisticas/

Colbún S.A. (2025). *Cuenta Pública de Colbún en Coronel abordó gestión de la Central Santa María y relación con la comunidad*. https://www.colbun.cl/corporativo/sala-de-prensa/noticias-y-comunicados/detalle/2025/06/16/cuenta-publica-de-colbun-en-coronel-abordo-gestion-de-la-central-santa-maria-y-relacion-con-la-comunidad

Coordinador Eléctrico Nacional. (2025). *Reporte de operación y estadísticas del Sistema Eléctrico*

Nacional.

https://www.coordinador.cl

Deng, L., Lai, H., Zang, G., Menon, A., Farnsworth, A. M., Gencer, E., Ghoniem, A., Green, W. H., & Stoner, R. J. (2024). Decarbonizing of power plants by ammonia co-firing: Design, techno-economic, and life-cycle analyses. *International Journal of Green Energy, 21*(15), 3521–3537.

https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2386066

Energy Sector Management Assistance Program. (2021). *Coal plant repurposing for ageing coal fleets in developing countries* (Technical Report 016/21). World Bank. https://documents1.worldbank.org/curated/en/144181629878602689/pdf/Coal-Plant-Repurposing-for-Ageing-Coal-Fleets-in-Developing-Countries-Technical-Report.pdf

ENGIE Energía Chile. (2022, 28 de septiembre). *ENGIE Chile cierra su última unidad a carbón en Tocopilla*.

https://www.engie.cl/engie-chile-cierra-su-ultima-unidad-a-carbon-en-tocopilla/

ENGIE Energía Chile. (2026, 9 de junio). *Presidente José Antonio Kast inaugura en Tocopilla el primer complejo energético reconvertido del país*.

https://www.engie.cl/presidente-jose-antonio-kast-inaugura-en-tocopilla-el-primer-complejo-energetico-reconvertido-del-pais/

ENGIE Energía Chile. (s. f.). *Flexible generation & retail*.

https://www.engie.cl/flexible-generation-retail/

Enel Chile. (2022). *Cómo se gestó el cierre de todas nuestras plantas a carbón*.

https://www.enel.cl/es/historias/a202209-como-se-gesto-el-cierre-de-todas-nuestras-plantas-a-carbon.html

Enel Generación Chile. (2025, 21 de noviembre). *Enel Generación inicia fase de desmantelamiento de la infraestructura de Central Bocamina*.

https://www.enel.cl/es/conoce-enel/prensa/press-enel-generacion/d2025-11/enel-

generacion-inicia-fase-de-desmantelamiento-de-la-infraestructura-de-central-bocamina

Fujimori, T. (2026). Ammonia-fueled power generation for energy transition. *Engineering, 59*(4), 26–31. https://doi.org/10.1016/j.eng.2026.01.012

Gobierno de Chile. (2026, 18 de junio). *Mesa interministerial por el empleo: Se crearán 50 mil puestos de trabajo*. https://www.gob.cl/noticias/mesa-interministerial-empleo-50-mil-puestos-laborales/

Guacolda Energía SpA. (2023). *Memoria integrada Guacolda 2023*. https://guacoldaenergia.cl/wp-content/uploads/MemoriaIntegradaGuacolda2023.pdf

Guacolda Energía SpA. (2024). *Memoria integrada Guacolda 2024*. https://guacoldaenergia.cl/memoria2024.pdf

Guacolda Energía SpA. (s. f.-a). *Proyecto de co-combustión de amoníaco verde*. https://guacoldaenergia.cl/proyecto-de-co-combustion-de-amoniaco-verde.html

Guacolda Energía SpA. (s. f.-b). *Rol social y compromiso con la región*. https://guacoldaenergia.cl/rol-social-y-compromiso-con-la-region.html

Halim, I., Zain, N. S., & Khoo, H. H. (2025). Assessing the feasibility of ammonia utilization for power generation: A techno-economic-environmental study. *Applied Energy, 386*, 125581. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125581

IHI Corporation. (2026, 29 de junio). *Technical verifications for practical application completed on ammonia single firing burner for thermal power plant boilers: Stable firing and compliance with environmental standards were achieved*. https://www.ihi.co.jp/en/all_news/2026/resources_energy_environment/1202094_13814.html

Inodú. (2018). *Estudio de alternativas tecnológicas al retiro y/o reconversión de las unidades de*

carbón en Chile. Desarrollado por encargo de GIZ para el Ministerio de Energía. http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/11_2018_inodu_alternativas_tecnologicas.pdf

Instituto Nacional de Estadísticas. (2026, 28 de agosto). *La tasa de desocupación nacional fue 9,5% en el trimestre mayo-julio de 2026*. https://www.ine.gob.cl/sala-de-prensa/prensa/general/noticia/2026/08/28/la-tasa-de-desocupaci%C3%B3n-nacional-fue-9-5-en-el-trimestre-mayo---julio-de-2026

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

International Atomic Energy Agency, United Nations Department of Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat, & European Environment Agency. (2005). *Energy indicators for sustainable development: Guidelines and methodologies*. International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1222_web.pdf

International Energy Agency. (2021a). *Phasing out unabated coal: Current status and three case studies*. IEA. https://www.iea.org/reports/phasing-out-unabated-coal-current-status-and-three-case-studies

International Energy Agency. (2021b). *The role of low-carbon fuels in the clean energy transitions of the power sector*. IEA. https://www.iea.org/reports/the-role-of-low-carbon-fuels-in-the-clean-energy-transitions-of-the-power-sector

International Energy Agency. (2024a). *Accelerating just transitions for the coal sector: Strategies for rapid, secure and people-centred change*. IEA. https://www.iea.org/reports/accelerating-just-transitions-for-the-coal-sector

International Energy Agency. (2024b). *National Climate Resilience Assessment for Chile*. IEA. https://www.iea.org/reports/national-climate-resilience-assessment-for-chile

International Energy Agency. (2025a). *Global Energy Review 2025: Global trends*. IEA. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/global-trends

International Energy Agency. (2025b). *Global Energy Review 2025: Key findings*. IEA. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/key-findings

International Energy Agency. (2026). *Financing the modernisation of power systems beyond coal: The role of transition credits in Southeast Asia*. IEA. https://www.iea.org/reports/financing-the-modernisation-of-power-systems-beyond-coal

International Renewable Energy Agency. (2024). *World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway*. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024

International Renewable Energy Agency & Ammonia Energy Association. (2022). *Innovation outlook: Renewable ammonia*. IRENA. https://www.irena.org/Publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia

JERA Co., Inc. (2024, 26 de junio). *Conclusion of fuel ammonia substitution demonstration testing at Hekinan Thermal Power Station*. https://www.jera.co.jp/en/news/notice/20240626_1954

Jindal, A., & Shrimali, G. (2022). Cost–benefit analysis of coal plant repurposing in developing countries: A case study of India. *Energy Policy, 164*, 112911. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112911

Kefford, B. M., Ballinger, B., Schmeda-Lopez, D. R., Greig, C., & Smart, S. (2018). The early retirement challenge for fossil fuel power plants in deep decarbonisation scenarios. *Energy Policy, 119*, 294–306. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.018

Larraín, S., & Melej, G. (2023). *Retiro del carbón al 2030: Avances y tareas pendientes en el cronograma de descarbonización en Chile*. Fundación Chile Sustentable. https://www.chilesustentable.net/wp-content/uploads/2023/08/avances-de-descarbonizacion-web-1.pdf

Lee, B.-H., Bae, Y.-H., Cho, S.-H., Kim, G.-M., & Jeon, C.-H. (2023). Comprehensive technical review for fundamental characteristics and application of NH_3 co-firing with coal. *Chemical Engineering Journal, 474*, 145587. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145587

Liu, H., Zhang, H., Wang, C., Si, T., Zou, C., & Xu, L. (2025). Effect of ammonia blending on the emission behavior of NOx during coal combustion: A global meta-analysis. *Journal of the Energy Institute, 121*, 102182. https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102182

Lugo, J. V., Sánchez Torres, N. N., Cavalcante, R. D. L. S., Lago, T. G. S., Lima, J. A., Ledesma, J. J. G., & Ando Junior, O. H. (2025). Evaluation of technological alternatives for the energy transition of coal-fired power plants, with a multi-criteria approach. *Energies, 18*(17), 4473. https://doi.org/10.3390/en18174473

Mardones, C. (2023). Economic, environmental, and social assessment of the replacement of coal-fired thermoelectric plants for solar and wind energy in Chile. *Journal of Cleaner Production, 411*, 137343. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137343

Ministerio de Energía de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*. Gobierno de Chile. https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/mini-sitio/estrategia-nacional_hidrogeno-verde_vdef.pdf

Ministerio de Energía de Chile. (2021). *Estrategia de Transición Justa en Energía: Parte I.*

Acompañando el cierre y/o nuevos usos de centrales a carbón en Chile. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/mini-sitio/estrategia-de-transicion-justa-en-energia

Ministerio de Energía de Chile. (2022a). *Conoce y participa en la Mesa de Transición Socio Ecológica Justa de Tocopilla*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/noticias/antofagasta/conoce-y-participa-en-la-mesa-de-transicion-socio-ecologica-justa-de-tocopilla

Ministerio de Energía de Chile. (2022b). *Política Energética Nacional 2022–2050*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/politica-energetica-nacional

Ministerio de Energía de Chile. (2024a). *Levantamiento y sistematización de información base en la encuesta sociolaboral en la comuna de Huasco, Región de Atacama*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/ua-2023_informe_final_levantamiento_de_informacion_huasco.pdf

Ministerio de Energía de Chile. (2024b). *Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023–2030*. Gobierno de Chile. https://www.energia.gob.cl/noticias/nacional/ministerio-de-energia-publica-el-plan-de-accion-de-hidrogeno-verde-2023-2030

Ministerio de Energía de Chile. (2024c). *Plan de Descarbonización: 2º tiempo de la transición energética. Habilitantes para prescindir del carbón en el Sistema Eléctrico Nacional* [Borrador para consulta pública]. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20241108_plan_descarbonizacion.pdf

Ministerio de Energía de Chile. (2024d). *Planificación Energética de Largo Plazo 2023–2027: Informe definitivo*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_definitivo_pelp_2023-2027.pdf

Ministerio de Energía de Chile. (2024e). *Proceso de descarbonización de la matriz eléctrica chilena*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/descarbonizacion

Ministerio de Energía de Chile. (2024f). *Reconversión productiva*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/reconversion_productiva_-_18_ene.pdf

Ministerio de Energía de Chile. (2025). *Plan de Descarbonización*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/consultas-publicas/plan-de-descarbonizacion

Ministerio de Energía de Chile. (2026a). *Incentivos para la aceleración de la reconversión de centrales termoeléctricas a carbón en Chile: Informe final – junio 2026*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/documentos

Ministerio de Energía de Chile. (2026b). *Ruta Energética 2026–2030*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/informacion-general/ruta-energetica-2026-2030

Ministerio de Energía de Chile. (s. f.-a). *Balance de energía*. Energía Abierta. http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/

Ministerio de Energía de Chile. (s. f.-b). *Balance Nacional de Energía*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/pelp/balance-nacional-de-energia

Ministerio de Energía de Chile. (s. f.-c). *Más información: Hidrógeno verde*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/node/20943

Ministerio del Medio Ambiente. (2022). *Ley N.º 21.455, Ley Marco de Cambio Climático*. Gobierno de Chile. https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1177286

Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.-a). *Calidad del aire: Huasco*. Aire en Línea. https://aireenlinea.mma.gob.cl/calidad-del-aire/huasco/

Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.-b). *Evaluación y seguimiento de los efectos potenciales en la salud de las personas por exposición crónica a contaminantes atmosféricos: Medida Coronel A.1.6*. Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Coronel. https://pras.mma.gob.cl/coronel/medida-coronel-a-1-6/

Mitsubishi Heavy Industries. (2022, 7 de diciembre). *MHI signs MoU with Chile's Guacolda Energía for feasibility study of ammonia co-firing at a coal-fired thermal power plant*. https://www.mhi.com/news/221207.html

Mitsubishi Heavy Industries. (2023a). Development of ammonia burner at coal-fired boilers for decarbonized society. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 60*(3). https://www.mhi.com/technology/review/abstract-60-3-60

Mitsubishi Heavy Industries. (2023b, 28 de noviembre). *MHI succeeded combustion test of ammonia single-fuel burners: Promoting the energy transition with CO_2 emission reduction technologies for existing thermal power plants*. https://www.mhi.com/news/23112801.html

Pauschert, D. (2009). *Study of equipment prices in the power sector* (ESMAP Technical Paper No. 122/09). Energy Sector Management Assistance Program, World Bank. https://documents1.worldbank.org/curated/en/952421468330897396/pdf/817250ESM0ESMA0Box0379844B00PUBLIC0.pdf

Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8*(4), 365–381. https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007

Rivero-Iglesias, J. M. (2025). A novel combined hybrid group multi-criteria decision-making model for the selection of power generation technologies. *Systems, 13*(9), 742. https://doi.org/10.3390/systems13090742

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*.

McGraw-Hill.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2022). *Cierre Central Termoeléctrica Tarapacá y su vertedero de cenizas*. https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=b7%2F09%2Fb42dadb0ac65da0045e26a7fd4aa112a15f8

Sun, W., Lin, Q., Li, H., Fang, S., Chen, Y., Cheng, Y., Ya, H., et al. (2025). Simulation study on coal and ammonia co-firing in a tangential firing boiler under different ammonia injection methods. *Scientific Reports, 15*, 15768. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98792-5

Sun, Y., Li, Z., Wang, Q., Zhang, J., & Kong, H. (2023). Low carbon pathway and life cycle assessment of ammonia co-firing in coal power plants under the context of carbon neutrality. *Energy Conversion and Management, 296*, 117648. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117648

Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*. Springer.

Triantaphyllou, E., & Sánchez, A. (1997). A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision-making methods. *Decision Sciences, 28*(1), 151–194. https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x

United Nations. (2024). *What is net zero?* https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition

United Nations. (s. f.). *Causes and effects of climate change*. United Nations. https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change

United Nations Environment Programme. (2017). *Impacts of pollution on our health and the planet: The case of coal power plants*. UNEP. https://www.unep.org/resources/perspective-series/issue-no-28-impacts-pollution-our-health-and-planet-case-coal-power

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

Viviani, P., Leiva, C., Ojeda, M. J., Ahumada, E., & Cortés, S. (2021). Daño en salud respiratoria en comunas expuestas a centrales termoeléctricas a carbón en el norte de Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias, 37*(1). https://revchilenfermrespir.cl/index.php/RChER/article/view/971

Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(9), 2263–2278. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021

Wang, X., Fan, W., Chen, J., & Zhang, H. (2024). Experimental study of effect of a novel ammonia/coal co-firing mode on NOx emission under high temperature conditions. *Renewable Energy, 235*, 121379. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121379

Xi, Z., Guo, T., Cao, F., Duan, Y., & Yang, Z. (2025). Techno-economic analysis of coal-fired with green ammonia co-firing power system devoted to lower carbon emission. *Energy, 334*, 137465. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137465

Yamashita, T., Amari, T., Sumida, T., Haari, E., Matsuo, K., & Takayama, A. (2025). Development of ammonia fuel conversion technology for coal-fired boilers aiming for decarbonized society. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 62*(3), 1–10. https://www.mhi.com/technology/review/pdf/e623/e623030.pdf

Zhao, F., Li, Y., Zhou, X., Wang, D., Wei, Y., & Li, F. (2023). Co-optimization of decarbonized operation of coal-fired power plants and seasonal storage based on green ammonia co-firing. *Applied Energy, 341*, 121140. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121140.

14. ANEXOS

Anexo A. Desarrollo complementario de los cálculos del método AHP.

A.1. Matriz normalizada de comparación de criterios.

Criterio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Promedio
C1	0,2727	0,2526	0,1818	0,4138	0,1667	0,3000	0,1600	**0,2497**
C2	0,1364	0,1263	0,1818	0,1034	0,2222	0,0750	0,2400	**0,1550**
C3	0,0909	0,0421	0,0606	0,0517	0,1111	0,0500	0,0400	**0,0638**
C4	0,1364	0,2526	0,2424	0,2069	0,2222	0,3000	0,2400	**0,2286**
C5	0,0909	0,0316	0,0303	0,0517	0,0556	0,0500	0,0800	**0,0557**
C6	0,1364	0,2526	0,1818	0,1034	0,1667	0,1500	0,1600	**0,1644**
C7	0,1364	0,0421	0,1212	0,0690	0,0556	0,0750	0,0800	**0,0827**

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Desarrollo complementario del análisis de sensibilidad de las ponderaciones.

B.1. Ponderaciones y prioridades globales ante variaciones en C1.

Escenario	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Cierre	Reconv.
−20%	19,98%	16,53%	6,80%	24,38%	5,94%	17,53%	8,82%	**47,92%**	**52,08%**
−10%	22,47%	16,02%	6,59%	23,62%	5,76%	16,99%	8,55%	**48,51%**	**51,49%**
Base	24,97%	15,50%	6,38%	22,86%	5,57%	16,44%	8,27%	**49,09%**	**50,90%**
+10%	27,47%	14,98%	6,17%	22,10%	5,38%	15,89%	7,99%	**49,68%**	**50,32%**
+20%	29,96%	14,47%	5,95%	21,34%	5,20%	15,34%	7,72%	**50,26%**	**49,74%**

Fuente: Elaboración propia.

B.2. Ponderaciones y prioridades globales ante variaciones en C4.

Escenario	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Cierre	Reconv.
−20%	26,45%	16,42%	6,76%	18,29%	5,90%	17,41%	8,76%	**51,01%**	**48,98%**
−10%	25,71%	15,96%	6,57%	20,57%	5,73%	16,93%	8,51%	**50,05%**	**49,94%**
Base	24,97%	15,50%	6,38%	22,86%	5,57%	16,44%	8,27%	**49,09%**	**50,90%**
+10%	24,23%	15,04%	6,19%	25,15%	5,41%	15,95%	8,03%	**48,13%**	**51,86%**
+20%	23,49%	14,58%	6,00%	27,43%	5,24%	15,47%	7,78%	**47,17%**	**52,82%**

Fuente: Elaboración propia

B.3. Ponderaciones y prioridades globales ante variaciones en C6.

Escenario	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Cierre	Reconv.
−20 %	25,95%	16,11%	6,63%	23,76%	5,79%	13,15%	8,60%	**47,58%**	**52,42%**
−10 %	25,46%	15,81%	6,51%	23,31%	5,68%	14,80%	8,43%	**48,34%**	**51,66%**
Base	24,97%	15,50%	6,38%	22,86%	5,57%	16,44%	8,27%	**49,09%**	**50,90%**
+10 %	24,48%	15,19%	6,25%	22,41%	5,46%	18,08%	8,11%	**49,85%**	**50,15%**
+20 %	23,99%	14,89%	6,13%	21,96%	5,35%	19,73%	7,94%	**50,60%**	**49,40%**

Fuente: Elaboración propia