

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**ANÁLISIS ESTRATÉGICO DE LA VIABILIDAD AMBIENTAL Y
OPERATIVA DEL USO DE HIDRÓGENO VERDE EN CAMIONES
CAEX DE LA INDUSTRIA MINERA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERIA CIVIL

INDUSTRIAL

AUTOR

MIGUEL GODOI BRAVO

PROFESOR GUÍA

MARIA PILAR GÁRATE CHATEAU

SANTIAGO DE CHILE, AGOSTO 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia, en especial a mis padres, mis hermanas, mis cuñados y mis queridos sobrinitos. Gracias por el incondicional apoyo a lo largo de todos estos años de estudio y por la constante preocupación. Su creencia en mí y los consejos siempre orientados a superar nuevas metas han sido fundamentales. Les estoy agradecido de todo corazón.

Además, quiero expresar mi gratitud a mi querido perrito Tobi, quien aunque no está físicamente conmigo en este momento, sé que estaría feliz de compartir este logro conmigo. Su compañía y amor incondicional han sido una fuente constante de alegría y consuelo.

También quiero expresar mi gratitud a mis amigos cercanos, Alexis Alfaro, Natalia Valdés, Rodrigo Muñoz, Fernanda Rocha, Valentina Abarca, Esteban Pinto y a todo el grupo de Pibas y Pibes. Durante estos años, han sido un apoyo invaluable en la universidad, complementándonos, ayudándonos mutuamente y motivándonos para seguir adelante en este camino.

Por último, mi sincero agradecimiento a mi profesora guía por su orientación experta y sus valiosos consejos en la elaboración de mi memoria. Aprecio enormemente su simpatía y disposición constante.

RESUMEN EJECUTIVO

La crisis climática global ha generado una creciente preocupación y urgencia por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mitigar el impacto ambiental de diversas industrias, incluida la minería. En este contexto, la presente memoria se enfoca en analizar el potencial uso del hidrógeno verde como fuente de energía para camiones CAEX en la industria minera chilena, específicamente en operaciones de mina rajo abierto, con el objetivo de evaluar su viabilidad operacional y ambiental.

La minería del cobre, una de las principales actividades económicas de Chile, tiene un impacto significativo en el consumo de combustibles fósiles. En las operaciones de mina rajo abierto, los camiones CAEX son responsables de gran parte del consumo de diésel, con cada camión consumiendo en promedio aproximadamente 1,500,000 de litros de diésel al año, lo que genera alrededor de 3,800 toneladas de CO₂ anuales por camión. La implementación de motores duales, que operan con una mezcla de 60% hidrógeno y 40% diésel, se presenta como una opción viable para reducir estas emisiones. Además, actualmente se está utilizando el sistema trolley, que también contribuye a la reducción del consumo de diésel.

Para la proyección de la energía necesaria, se obtuvieron datos de fuentes confiables como el Ministerio de Energía y organismos internacionales. Se compararon dos escenarios: el escenario de referencia basado en el uso exclusivo de diésel y el escenario alternativo que combina el uso de hidrógeno verde con el sistema trolley. La tasa de participación del hidrógeno verde se proyectó a lo largo de los años, considerando una reducción progresiva del consumo de diésel debido a la implementación del sistema trolley. Las proyecciones de emisiones se realizaron para cada año de estudio los cuales son 2025, 2030, 2040 y 2050, logrando así cuantificar el ahorro de emisiones al

comparar ambos escenarios.

Los resultados del estudio muestran una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el escenario alternativo. Para el año 2025, el ahorro de emisiones es mínimo debido a la baja incorporación inicial del hidrógeno verde. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, la reducción de emisiones se vuelve más notable, alcanzando la carbono neutralidad para el año 2048 con el uso combinado del sistema trolley y el hidrógeno verde. Al final del período de estudio, se proyecta un ahorro acumulado de 38,500 kilotoneladas de CO₂ equivalente, lo que resalta la eficacia de esta estrategia en la disminución de la huella de carbono en la industria minera.

Además, se lleva a cabo un estudio detallado de los costos operativos, analizando las proyecciones de costos de producción de energía renovable e hidrógeno verde obtenidos de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. La proyección de costos del diésel se basó en el informe anual de perspectivas energéticas 2021 de la Energy Information Administration (EIA). Estas proyecciones fueron consideradas para los años 2025, 2030, 2040 y 2050 y se evalúa cómo estos costos afectan la viabilidad operativa de los diferentes escenarios.

Finalmente, se realiza un análisis de los ahorros en costos operativos utilizando el sistema trolley combinado con hidrógeno verde. Los resultados indican que, aunque el escenario base es más rentable en el corto plazo, los costos operativos tienden a incrementarse significativamente a largo plazo. En contraste, el escenario alternativo con hidrógeno verde y el sistema trolley demuestra ser más económico a partir de 2030, debido a la disminución progresiva en los costos de producción de hidrógeno verde y al uso eficiente de la energía renovable.

ABSTRACT

The global climate crisis has generated growing concern and urgency to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and mitigate the environmental impact of various industries, including mining. In this context, this thesis focuses on analyzing the potential use of green hydrogen as an energy source for CAEX trucks in the Chilean mining industry, specifically in open-pit mine operations, with the aim of evaluating its operational and environmental viability.

Copper mining, one of Chile's main economic activities, has a significant impact on fossil fuel consumption. In open-pit mine operations, CAEX trucks are responsible for a large part of diesel consumption, with each truck consuming approximately 1,500,000 liters of diesel per year, generating around 3,800 tons of CO₂ annually per truck. The implementation of dual-fuel engines, operating with a mixture of 60% hydrogen and 40% diesel, appears as a viable option to reduce these emissions. Additionally, the trolley system, currently in use, also contributes to the reduction of diesel consumption.

For the energy projection, data were obtained from reliable sources such as the Ministry of Energy and international organizations. Two scenarios were compared: the reference scenario based on the exclusive use of diesel and the alternative scenario that combines the use of green hydrogen with the trolley system. The participation rate of green hydrogen was projected over the years, considering a progressive reduction in diesel consumption due to the implementation of the trolley system. Emission projections were made for each study year, which are 2025, 2030, 2040, and 2050, thus quantifying the emission savings when comparing both scenarios.

The results of the study show a significant reduction in GHG emissions in the alternative scenario. For the year 2025, the emission savings are minimal due to the low initial incorporation

of green hydrogen. However, as time progresses, the emission reduction becomes more notable, reaching carbon neutrality by 2048 with the combined use of the trolley system and green hydrogen. By the end of the study period, an accumulated saving of 38,500 kilotons of CO₂ equivalent is projected, highlighting the effectiveness of this strategy in reducing the carbon footprint in the mining industry.

Furthermore, a detailed study of operational costs is carried out, analyzing the cost projections for the production of renewable energy and green hydrogen obtained from the National Green Hydrogen Strategy. The diesel cost projection was based on the 2021 Annual Energy Outlook report by the Energy Information Administration (EIA). These projections were considered for the years 2025, 2030, 2040, and 2050, evaluating how these costs affect the operational viability of the different scenarios.

Finally, an analysis of operational cost savings using the trolley system combined with green hydrogen is performed. The results indicate that, although the base scenario is more profitable in the short term, operational costs tend to increase significantly in the long term. In contrast, the alternative scenario with green hydrogen and the trolley system proves to be more economical from 2030 onwards, due to the progressive decrease in green hydrogen production costs and the efficient use of renewable energy.

Índice

1	Problema de investigación	5
2	Objetivos	8
2.1	Objetivo General.....	8
2.2	Objetivos Específicos	8
3	Marco Teórico.....	9
3.1	Cambio Climático y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	9
3.1.1	Introducción al Cambio Climático y su Relación con las Emisiones de GEI	9
3.1.2	Situación Mundial del Cambio Climático.....	10
3.1.3	Estadísticas y Tendencias Recientes en las Emisiones Chilenas.....	14
3.2	Políticas de Mitigación y Descarbonización.....	20
3.2.1	Compromisos Internacionales	20
3.2.2	Marco Regulatorio Nacional	23
3.3	Contexto de la Industria Minera en Chile.....	26
3.3.1	Importancia Económica y Ambiental de la Industria Minera	27
3.3.2	Consumo de Energía y Emisiones en la Minería Chilena	29
3.3.3	Rol Fundamental de los CAEX: Propósito y Funcionalidad.....	33
3.4	Hidrógeno Verde Como Combustible	35
3.4.1	Tecnologías Emergentes y Actuales	36
3.5	Ventajas de Chile para la Producción de Hidrógeno Verde	38
3.5.1	Chile, un País Potencia en Energía Renovable.....	38
3.5.2	Comparación Energética, Costos y Emisiones con Combustibles fósiles.....	42
3.5.3	Hidrógeno Verde en la Industria Minera.....	45
4	Metodología	48
4.1	Análisis de Aspectos Técnicos de los Camiones CAEX.....	48
4.1.1	Identificación de Componentes Clave y Tecnologías Disponibles	48
4.1.2	Evaluación de Consumo Energético	52
4.2	Demanda de Combustible en el Escenario Actual.....	57
4.2.1	Análisis de Consumo de Diésel en la Industria Minera	57
4.3	Demanda de Hidrógeno en un Escenario Alternativo	63
4.3.1	Proyección de Demanda de Hidrógeno Verde para la Minería.....	63
4.4	Evaluación de la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	68
4.4.1	Estimación de las Emisiones Reducidas mediante el Uso de Hidrogeno Verde.....	70
4.5	Análisis de Costos Operativos	75
4.5.1	Evaluación de Costos Operativos Asociados al Uso de Diésel vs Hidrógeno Verde.....	75
4.6	Conclusiones.....	86

4.6.1	Recomendaciones.....	88
5	Anexos	91
6	Referencias.....	97

Índice de Figuras

Figura 3.1 Diez países causan casi el 70% de las emisiones mundiales de CO ₂	12
Figura 3.2 Emisiones globales por tipo de combustible en el tiempo	13
Figura 3.3 Evolución de la temperatura media en Chile	15
Figura 3.4 Evolución de la precipitación anual en Chile	16
Figura 3.5 Emisiones de CO ₂ eq. según el sector	19
Figura 3.6 Participación de la minería en el PIB (porcentaje)	28
Figura 3.7 Consumo de energía de Chile en el 2020	30
Figura 3.8 Consumo de electricidad por sector en el 2020	30
Figura 3.9 Consumo de Energía en Combustibles y Electricidad.	31
Figura 3.10 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustible.	32
Figura 3.11 Emisiones de GEI directos por proceso.	33
Figura 3.12 Tipos de hidrógeno diferenciados por su tipo de producción (Fuente: Ah2V Biobío s.f.).....	37
Figura 3.13 Capacidad Instalada Neta de Generación Eléctrica (Fuente: Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía CNE 2024).	40
Figura 3.14 Evolución de la Generación Bruta de Energía Eléctrica ERNC.....	41
Figura 3.15 Energía contenida en distintos combustibles por cada unidad de kilo y litro.....	43
Figura 3.16 Costo de producción del H ₂ a partir de energía solar FV y eólica a largo plazo	44
Figura 4.1 CAEX 930E.....	48
Figura 4.2 Motor de tracción de inducción GDY106.....	50
Figura 4.3 Camión CAEX asistido por sistema trolley	51
Figura 4.4 Velocidad admisible y desarrollada en el camión cargado	53
Figura 4.5 Consumo de combustible, velocidad desarrollada, rimpull y potencia.....	54
Figura 4.6 Emisión de CO ₂ , velocidad desarrollada, rimpull en el camión cargado	54
Figura 4.7 Proyección de la demanda energética de diésel en el sector mina rajo abierto.	59
Figura 4.8 Consumo actual sin trolley.....	61
Figura 4.9 Consumo con sistema trolley.....	61
Figura 4.10 Proyección del porcentaje de incorporación de hidrógeno para cubrir requerimientos energéticos en el sector mina rajo abierto.....	65
Figura 4.11 Comparación de las emisiones de CO ₂ eq (kton) entre ambos escenarios	72
Figura 4.12 Comparación de las emisiones de CO ₂ eq (kton): Escenario Actual vs Sistema Trolley vs Motor Dual + Sistema Trolley.....	74
Figura 4.13 Proyección del costo nivelado de hidrógeno verde en USD / kgH ₂	78
Figura 4.14 Proyección del costo nivelado de electricidad renovable en USD / MWh	80

Índice de Tablas

Tabla 3.1: <i>Origen de las emisiones de material particulado MP 2,5</i>	17
Tabla 3.2: <i>Emisiones totales de GEI por gas en 2020</i>	18
Tabla 3.3: <i>Emisiones de GEI por sector en 2020</i>	18
Tabla 3.4: <i>Consumo Energético en el sector Minero en TCal</i>	31
Tabla 4.1: <i>Especificaciones del sistema eléctrico</i>	49
Tabla 4.2: <i>Especificaciones motor de combustión</i>	49
Tabla 4.3: <i>Indicadores de desempeño del camión CAEX en distintos sectores</i>	56
Tabla 4.4: <i>Proyección de la demanda energética de diésel en mina rajo abierto</i>	59
Tabla 4.5: <i>Diésel requerido para la demanda energética y número de CAEX que abastecen</i>	60
Tabla 4.6: <i>Cantidad de camiones con motor tradicional y motor dual</i>	66
Tabla 4.7: <i>Estimación de demanda energética de hidrógeno como combustible</i>	66
Tabla 4.8: <i>Estimación de toneladas de hidrógeno como combustible en Mina Rajo</i>	67
Tabla 4.9: <i>Resumen de ambos escenarios para los años 2025, 2030, 2040 y 2050</i>	68
Tabla 4.10: <i>Características camión de extracción minera</i>	69
Tabla 4.11: <i>Estimación de las emisiones de CO₂ de camiones CAEX</i>	70
Tabla 4.12: <i>Estimación de las emisiones de CO₂ de camiones CAEX</i>	71
Tabla 4.13: <i>Proyección Costo del diésel</i>	77
Tabla 4.14: <i>Proyección costo nivelado del hidrógeno verde</i>	79
Tabla 4.15: <i>Proyección costo nivelado de energía renovable</i>	81
Tabla 4.16: <i>Costo de Operaciones con Diésel en el Escenario Base</i>	81
Tabla 4.17: <i>Costo de Operación del Diésel y Electricidad Renovable en el Escenario Base utilizando el Sistema Trolley</i>	82
Tabla 4.18: <i>Costo de Operación del Diésel, Electricidad Renovable, hidrógeno verde en el escenario alternativo</i>	83
Tabla 4.19: <i>Resumen de costos operacionales totales de energía para cada escenario</i>	83
Tabla 4.20: <i>Ahorros operacionales usando el sistema trolley y el sistema trolley+H₂</i>	84

1 Problema de investigación

El calentamiento global representa una de las situaciones más urgentes y alarmantes que la humanidad debe afrontar en la actualidad. Según datos proporcionados por las Naciones Unidas, los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han alcanzado niveles nunca antes registrados en los últimos tres millones de años (Naciones Unidas, s.f.a). Este fenómeno, ampliamente atribuido a la actividad humana, resultante de más de siglo y medio de industrialización, deforestación y agricultura a gran escala, ha llevado a una significativa emisión de dióxido de carbono (CO₂), el cual queda suspendido en la atmósfera, destruyendo la capa de ozono, dañando el equilibrio natural y provocando el calentamiento global. En este contexto, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) son con diferencia, los que más contribuyen al cambio climático, ya que representan más del 75% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y casi el 90% de todas las emisiones de dióxido de carbono (Naciones Unidas, s.f.b).

¿Cuál es la situación en Chile respecto al efecto invernadero? En el año 2020, se registró un aumento del 128% en las emisiones de GEI desde 1990, y un incremento del 2% desde 2016. El dióxido de carbono (CO₂) se destaca como el gas más emitido, representando el 78% del total de emisiones, principalmente producto de la quema de combustibles fósiles. Estas emisiones provienen en su mayoría del sector energético, donde la quema de carbón mineral y el uso de diésel para la generación eléctrica, así como la utilización de combustibles líquidos en el transporte terrestre, son los principales contribuyentes (Ministerio del Medio Ambiente, 2020a). De hecho, el mayor consumo de energía del país corresponde al sector industrial y minero (37%), seguido por el transporte (35%) y luego por el sector comercial, público y residencial (24%) (Comisión Nacional de Energía, 2020). Estos datos resaltan la importancia de abordar de manera

efectiva el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, especialmente en los sectores energéticos e industriales.

En este contexto, la industria minera chilena, vital para la economía del país, se encuentra en un momento crucial de su evolución. Si bien ha demostrado resiliencia y eficiencia en la extracción de minerales, enfrenta presiones cada vez mayores para reducir su huella ambiental y mejorar su sostenibilidad. Un componente crítico de esta industria es la extracción y transporte de minerales y materiales desde yacimientos distantes a los centros de procesamiento. Este proceso se basa principalmente en la utilización de camiones propulsados por motores que utilizan diésel, que consumen grandes cantidades de combustible y generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Ante esto, surge la interrogante ¿Cuál es el consumo actual de energía diésel en la industria minera chilena y cómo se proyecta su crecimiento a largo plazo?

La necesidad urgente de encontrar alternativas sostenibles y eficientes al diésel en la extracción y transporte minero, esencial desde perspectivas económicas y ambientales, se vuelve evidente. Los altos costos operativos y la presión para reducir las emisiones de carbono exigen una revisión profunda de las prácticas actuales. En este contexto, el hidrógeno verde emerge como una posible solución, una fuente de energía limpia que, implementada adecuadamente, podría transformar esta industria. Sin embargo, esta solución plantea la pregunta crucial, ¿Cuál es el potencial de producción de hidrógeno verde a nivel nacional y su disponibilidad en regiones mineras específicas?

En la actualidad, esta idea ya dio sus primeros pasos en el mundo, específicamente en Sudáfrica, se ha marcado un hito significativo al presentar a nivel global el primer prototipo de

camión minero impulsado por hidrógeno verde. En este avance, el equipo de AngloAmerican ha destacado que gracias a su sistema de propulsión híbrido basado en una batería de hidrógeno, este camión genera una cantidad notablemente mayor de energía en comparación con su contraparte diésel (H₂Chile, 2022).

Por su parte, Chile ha dado un paso decidido hacia la descarbonización en el sector minero, implementando políticas centradas en el hidrógeno verde en el año 2020. Estas políticas, combinadas con los notables avances tecnológicos y comerciales en la producción de hidrógeno verde, representan una oportunidad importante para impulsar la transición en sectores que resultan particularmente desafiantes de descarbonizar, como es el caso de la movilidad en la industria minera (Comisión Chilena del Cobre, 2022).

Ante este contexto, surge la pregunta fundamental: ¿Cuál podría ser el potencial impacto ambiental de la transición hacia el hidrógeno verde en la minería chilena? Esta es una interrogante clave que requiere un análisis profundo y exhaustivo para comprender completamente las implicaciones ambientales y evaluar los beneficios y desafíos asociados con esta transición hacia una fuente de energía más limpia y sostenible.

Es esencial destacar que este estudio se enfoca específicamente en camiones de Extracción y Acarreo (CAEX), elementos esenciales en la logística minera. Al considerar los CAEX como representativos de la industria, se busca analizar de manera exhaustiva las implicaciones ambientales de la transición hacia el hidrógeno verde. Este enfoque más específico nos permite no solo comprender los desafíos y oportunidades únicos de estos vehículos, sino también proporcionar conclusiones y recomendaciones que sean aplicables a la industria minera en su conjunto.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar el potencial uso del hidrógeno verde como fuente de energía para camiones CAEX en la industria minera chilena, evaluando el costo operativo y su impacto ambiental, para comprender si esta tecnología puede ser una alternativa económica, eficiente y sostenible, considerando su contribución a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar el estado actual de las políticas y proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero en el sector energético y la industria del hidrógeno verde en el transporte minero en Chile, para conocer barreras y necesidades de regulación.

Establecer una línea base de consumo de energía diésel en los camiones de extracción de la industria minera, con el propósito de proyectar la demanda futura de hidrógeno al considerarlo como un sustituto del diésel, permitiendo así realizar una comparación entre ambos escenarios en el largo plazo.

Estimar las reducciones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos derivados de la adopción de camiones de hidrógeno verde en la industria minera, para evaluar cómo esta medida contribuye a reducir el efecto del cambio climático.

Determinar la eficiencia energética de los camiones de extracción (CAEX) propulsados por hidrógeno verde en comparación con el uso de combustibles fósiles en operaciones mineras específicas, para poder proporcionar información clave en decisiones informadas y contribuir a la identificación de soluciones energéticas sostenibles y rentables en la industria.

3 Marco Teórico

3.1 Cambio Climático y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

3.1.1 *Introducción al Cambio Climático y su Relación con las Emisiones de GEI*

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos. Estos pueden ser naturales, debido a variaciones en la actividad solar o erupciones volcánicas grandes. Pero desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. (Naciones Unidas, s.f.c). En este contexto se entiende que es una variación que se está registrando en el clima del planeta, en gran medida provocado por la actividad humana. Teniendo como consecuencia en el aumento de las temperaturas medias, el derretimiento de los glaciares, un aumento de inundaciones, un aumento de sequías extremas, un aumento de eventos de precipitaciones extremas y un aumento de incendios forestales (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.).

La quema de combustibles fósiles genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que actúan como una manta que envuelve la tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas. Las emisiones principales de GEI que provocan el cambio climático son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), los que proceden del uso de la gasolina para conducir un coche o del carbón para calentar un edificio, por ejemplo. La agricultura y las actividades relacionadas con el petróleo y el gas son fuentes importantes de emisiones de metano.

Es importante mencionar también la diferencia entre el Efecto Invernadero y el fenómeno de Calentamiento Global. El primero es un fenómeno que, en condiciones normales, permite la vida en el planeta, impidiendo que el calor del sol que llega a la superficie terrestre sea rebotado

en su totalidad de nuevo a la atmósfera, permitiendo que cierto porcentaje quede mientras que el porcentaje restante es rechazado, facilitando la vida para los seres vivos. Mientras que el fenómeno de Calentamiento Global es una de las causas del efecto invernadero y que, a su vez, afectan el cambio climático. El calentamiento global supone un crecimiento considerable de las temperaturas de la Tierra. Esto se produce cuando los gases de efecto invernadero aumentan sus niveles en la atmósfera convirtiéndose en un fenómeno con consecuencias negativas para la vida planetaria (Fundación Aquae, 2021). El proceso es el siguiente: la quema de combustibles, la deforestación, la ganadería y otras prácticas, incrementan la cantidad de GEI en la atmósfera. Ésta al modificarse retiene más calor, dañando así el equilibrio natural y aumentando la temperatura de la Tierra.

3.1.2 Situación Mundial del Cambio Climático

Los efectos del cambio climático en nuestro planeta son cada vez más notorios. Se han observado fenómenos sin precedentes, y los datos entregados por las Naciones Unidas indican que la atmósfera ha alcanzado niveles de daño nunca antes registrados en los últimos tres millones de años, siendo esta una situación sumamente preocupante para la humanidad.

La temperatura global terrestre y oceánica anual ha aumentado en $0,08^{\circ}\text{C}$ por década desde 1880, mientras que desde 1981 la tasa de aumento es más del doble con $0,18^{\circ}\text{C}$ por década (Ministerio del Medio Ambiente, 2020b). Según publicaciones de Naciones Unidas (2023), la Organización Meteorológica Mundial ha revelado su actualización climática mundial anual, en donde se alerta que existe un 66% de probabilidades de que la temperatura media anual cercana a la superficie entre 2023 y 2027 supere en más de $1,5^{\circ}\text{C}$ los niveles preindustriales durante al menos un año y que hay un 98% de probabilidades de que uno de esos años sea el más cálido jamás registrado.

En cuanto a los océanos, según lo expuesto por Cwienk (2023) a partir de la información obtenida en el servicio de observación del clima de la UE, Copernicus, la superficie de los océanos del mundo registró su mayor temperatura histórica de 20,96°C batiendo el récord de 2016, desde abril de este año 2023, la temperatura media diaria de la superficie de los océanos (excluidas las regiones polares) se mantiene en niveles récord. Según los análisis de Copernicus, la media diaria de las temperaturas marítimas se situaba ya en 20,94°C el 19 de julio, teniendo una clara tendencia al alza. Además de esto, las temperaturas récord de las aguas superficiales continúan en el Atlántico Norte, ya que se comunicó el registro más alto de todo el Atlántico Norte, con una media de 0,91°C para el periodo. Según la Alianza por la Salud Alimentaria (2023), a partir de las informaciones de Copernicus, se tiene que debido a estas tendencias de altas temperaturas en los mares, los casquetes polares de la Antártida se reducen a niveles récords, reduciendo sus niveles por segundo año consecutivo. El área helada del océano que rodea el continente antártico tenía una superficie de 2.09 millones de kilómetros cuadrados, el nivel más bajo desde que empezó a ser medida desde 1978.

El incremento alarmante de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono destaca como una clara evidencia del cambio climático en curso, cuya concentración es la más alta desde hace tres millones de años y esta se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles. Considerando el boletín del año 2023 de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre los GEI, se explica que en 2021 se produjo la mayor subida interanual de las concentraciones de metano desde que comenzaron sus mediciones hace 40 años atrás. En el año 2021 las concentraciones de dióxido de carbono fueron de 415,7 partes por millón (ppm), las de metano, de 1908 partes por mil millones (ppmm) y las de óxido nitroso, de 334,5 ppmm. Estos valores constituyen, respectivamente, el 149%, el 262% y el 124% de los niveles preindustriales,

que corresponden a las concentraciones existentes antes de que las acciones humanas empezaran a alterar el equilibrio natural de dichos gases en la atmósfera, que remontan al año 1750.

Ahora en cuanto a las emisiones totales de GEI, alcanzaron los 40.600 millones de toneladas en el año 2022, cifra que incluye las procedentes de la deforestación. Las emisiones de dióxido de carbono de origen fósil aumentaron un 1% respecto a 2021, para alcanzar 36.600 millones de toneladas, un poco por encima de los niveles de 2019, el cual es un año récord para las emisiones de GEI. Este aumento se ve motivado principalmente por el consumo de petróleo (+2,2%) y de carbón (+1%) (Welle, 2022).

El G20 (grupo de 19 países más la Unión Europea, que reúne a las principales economías industrializadas) abarca el 75% total de emisiones de GEI y los 5 países que causan casi el 70% de las emisiones mundiales de CO₂ son China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón, todos estos datos corresponden al año 2021.

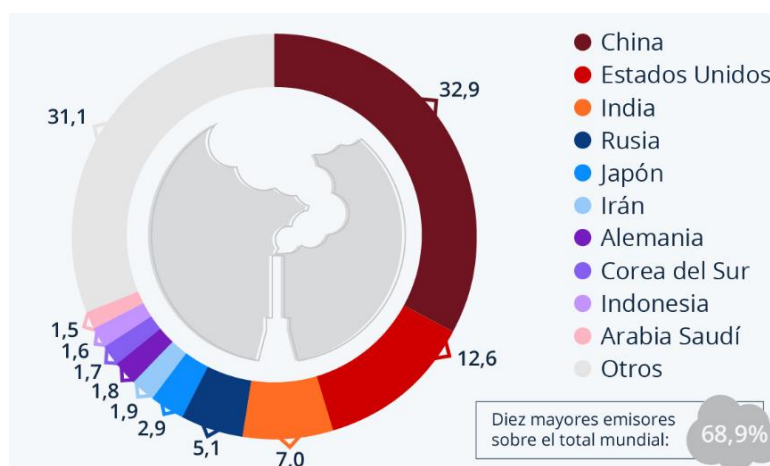


Figura 3.1 Diez países causan casi el 70% de las emisiones mundiales de CO₂ (Fuente: Comisión Europea, Cálculos de Statista, 2021)

Como muestra el gráfico de la **Figura 3.1**, la mayoría de los diez primeros países emisores

son asiáticos (y están entre los más poblados), mientras que sólo hay dos países europeos en la lista los cuales son Rusia y Alemania. Además, las actividades más contaminantes (extracción de petróleo y gas, industria manufacturera, etc.) se concentran en su mayoría o se han trasladado a un puñado de países productores (Roa, 2022).

Además, el Proyecto Global de Carbono en su decimoséptima versión de su Presupuesto Global publicada en 2022, presentó las emisiones de CO₂ a partir del uso de combustibles fósiles y el cambio de uso de la tierra. En cuanto a la fuente de procedencia de las emisiones mundiales de dióxido de carbono en el 2021, un 46% corresponde a carbón, un 35% al petróleo, un 15% al gas natural y el resto se atribuye a cemento.

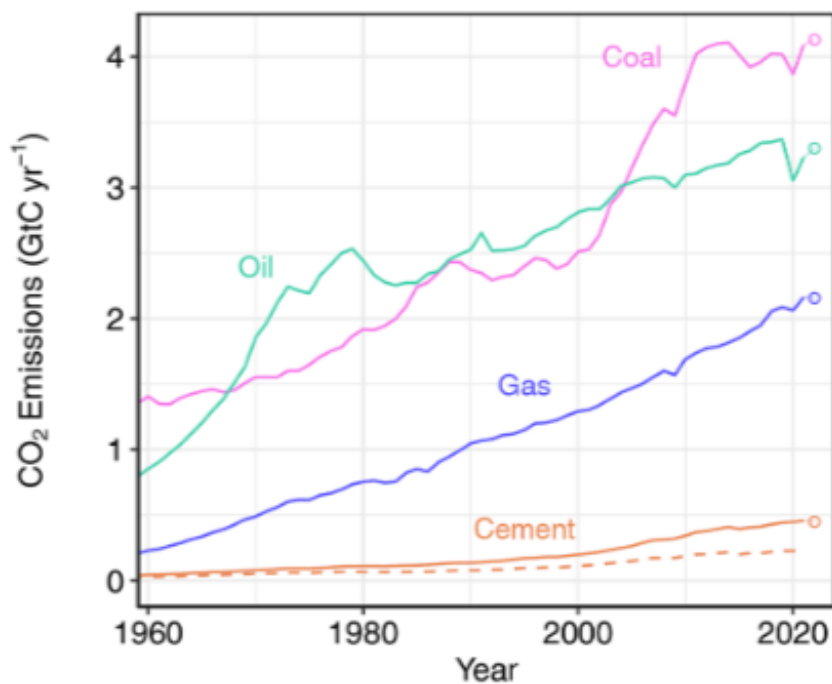


Figura 3.2 Emisiones globales por tipo de combustible en el tiempo (Fuente: Global Carbon Project, 2022)

Como puede observarse en la **Figura 3.2** las emisiones globales de CO₂ fósil han

aumentado cada década desde un promedio de $3,0 \pm 0,2$ GtC año⁻¹ (gigatoneladas de carbono por año) durante la década de 1960 a un promedio de $9,6 \pm 0,5$ GtC año⁻¹ durante 2012-2021 (Friedlingstein et al., 2022).

3.1.3 Estadísticas y Tendencias Recientes en las Emisiones Chilenas

Chile se ve directamente impactado por el cambio climático, ya que cumple con siete de los nueve criterios de vulnerabilidad establecidos por la UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). Esto se debe a la presencia de áreas costeras de baja altitud, regiones áridas y semiáridas, bosques, susceptibilidad a desastres naturales, propensión a sequías y desertificación, problemas de contaminación atmosférica en zonas urbanas y la existencia de ecosistemas montañosos.

En cuanto a la temperatura, la tasa de aumento de la temperatura media considerando el periodo desde 1961 al 2022, es de $+0,15^{\circ}\text{C}$ por década, mientras que la tendencia del periodo 1981-2021 es de $+0,14^{\circ}\text{C}$ /década (42 años). Los valores de la tendencia móvil varían entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ a $+0,6^{\circ}\text{C}$, siendo el mayor crecimiento entre el año 1992 hasta el 2021 (Gutiérrez, 2022).

Un 90% de las estaciones meteorológicas presentan calentamiento, mientras que el 10% restante se observan de tendencias negativas o frías, especialmente en la costa Norte-Centro de Chile. Las localidades que presentan la mayor tasa de aumento de la temperatura son las ubicadas en la cordillera y valles a lo largo de Chile. Aquellas que superan los de $+0,3^{\circ}\text{C}$ por década son: Combarbalá, Hurtado, Pudahuel, Cerro Guido, Curicó, Sierra Gorda, San José de Maipo, Calama, Cerro Calán.

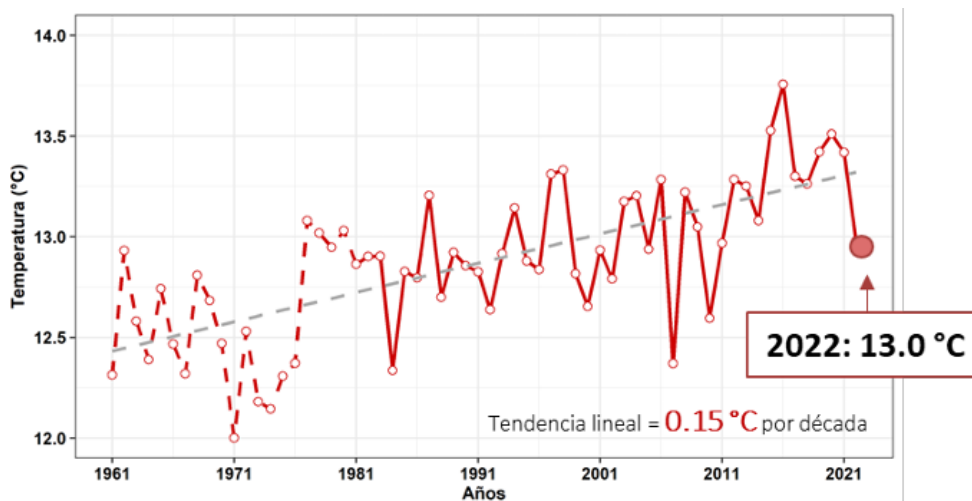


Figura 3.3 Evolución de la temperatura media en Chile (Fuente: Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile, 2022)

Como se observa en la **Figura 3.3** la temperatura media durante el 2022 fue de 13.0°C, aunque igualmente más cálido que el promedio climático +0,32°C, sin embargo, fue más bajo en 0,44°C respecto al año anterior, cabe mencionar que la línea segmentada roja es el promedio de 19 estaciones históricas con sesgo corregido y la línea segmentada gris indica la tendencia lineal.

Además de la tendencia creciente respecto a la temperatura media, las precipitaciones en Chile durante el año 2022 alcanzaron niveles de 567mm como promedio, quedando con un 22% de déficit anual y ubicándose como el decimotercer año más seco en el periodo 1961-2022.

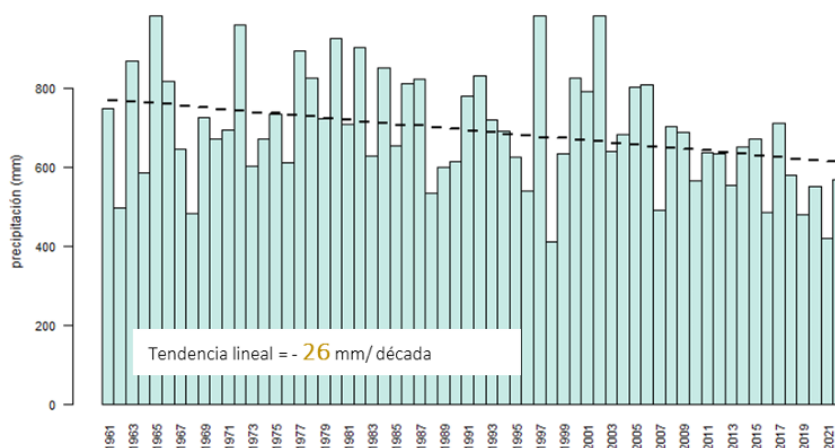


Figura 3.4 Evolución de la precipitación anual en Chile (Fuente: Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile, 2022)

De la **Figura 3.4** es posible notar que la tendencia nacional alcanzó los -26mm/década que equivale a una disminución de 4% cada diez años y con este año se completan 16 años consecutivos con precipitaciones bajo el promedio, presentando en los últimos cinco años un déficit sobre el 20%.

Por otro lado, con relación a los recursos hídricos, en general se encuentra un escenario desfavorable para los próximos años. Según el último estudio de World Resources Institute del Pacto Mundial de las Naciones Unidas (2019), Chile actualmente se encuentra en el puesto 18, ubicándose en el segundo nivel denominado “estrés hídrico alto” en donde la demanda de agua es más alta que la cantidad disponible. Debido a esto, Chile se posiciona como el primer país en América Latina en esta condición, seguido por México que ocupa el puesto 24. (Universidad de Chile, s.f.).

A pesar de lo mencionado previamente, en Chile, la atención principal en el ámbito de la gestión ambiental se centra en preservar la calidad del aire. En este contexto, la combustión de leña es la principal fuente de emisión de MP2,5 (partículas en suspensión de 2,5 micrómetros los cuales pueden ser perjudiciales para la salud).

Tabla 3.1: Origen de las emisiones de material particulado MP 2,5

Región	Energía	Industria	Minería	Residencial	Transporte
Arica y Parinacota	1%	7%	0%	39%	53%
Tarapacá	32%	6%	6%	23%	34%
Antofagasta	83%	5%	4%	3%	6%
Atacama	18%	70%	3%	5%	4%
Coquimbo	2%	6%	0%	66%	26%
Valparaíso	18%	2%	3%	71%	4%
Metropolitana	1%	2%	0%	81%	15%
O'Higgins	0%	2%	9%	87%	3%
Maule	0%	3%	0%	96%	1%
Ñuble	0%	4%	0%	96%	0%
Biobío	4%	5%	0%	90%	1%
Araucanía	0%	1%	0%	99%	0%
Los Ríos	0%	2%	0%	97%	1%
Los Lagos	0%	1%	0%	99%	0%
Aysén	0%	0%	0%	99%	0%
Magallanes	2%	1%	0%	92%	5%

Fuente: Primer inventario nacional de la calidad del aire, s.f.

A nivel nacional, más del 90% de las emisiones de partículas PM_{2,5} provienen del sector residencial. En la región Metropolitana, que alberga al 40% de la población, el 81% de estas emisiones se atribuye a la combustión de leña dentro de los hogares, utilizada principalmente para calefacción, cocina y calentamiento de agua. Según Nicolás Álamos, autor principal del estudio, el 15% restante de las emisiones en la región proviene del sector transporte. La investigación destaca que las actividades relacionadas con la energía, el transporte y la vivienda son las principales causantes de la contaminación en la zona norte del país. Mientras tanto, en el sur, la contaminación está mayormente vinculada al sector residencial, especialmente al uso de leña para la calefacción de viviendas (Uai, s.f.).

A modo de introducción es importante mencionar el concepto de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.). Éste se refiere a la “cuantía de emisiones de CO₂ que causarían el mismo forzamiento radiactivo integrado, en un horizonte temporal determinado, que cierta cantidad emitida de un gas de efecto invernadero o de una mezcla de gases de efecto invernadero” (Centro Cambio Global UC, s.f.).

El último informe Bienal de Actualización de Chile sobre el Cambio Climático mostró que en el año 2020 las emisiones de GEI totales ascendieron a 105.551 kt CO₂ eq. (Kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente), incrementándose en un 116% desde 1990 y disminuyendo en un 4% desde 2018. Esta variación interanual observada, se debe principalmente a la influencia de los incendios forestales de 2017 en el balance de GEI del país.

Tabla 3.2: Emisiones totales de GEI por gas en 2020

GEI	kt CO ₂ eq.
CO ₂	79.792
CH ₄	14.946
N ₂ O	6.232
Gases Fluorados	4.581
Total	105.551

Fuente: Elaboración propia usando los datos entregados en el Informe Bienal, 2022

Tabla 3.3: Emisiones de GEI por sector en 2020

Sector	kt CO ₂ eq.
Energía	79.724
Agricultura	6.930
Residuos	11.238
Procesos industriales y uso de productos	7.659
Total	105.551

Fuente: Elaboración propia usando los datos entregados en el Informe Bienal, 2022

De lo expresado en la **Tabla 3.2**, Las principales razones detrás de la tendencia en las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) son los vertidos de dióxido de carbono (CO₂) originados por la quema de combustibles fósiles destinados a la producción de electricidad y al transporte terrestre (categorizados en el sector Energía). Además, las emanaciones de metano (CH₄) se derivan del ganado durante el manejo y fermentación del estiércol, mientras que las

emisiones de óxido nitroso (N₂O) tienen su origen en la aplicación de nitrógeno en los suelos agrícolas.

Respecto a la participación de cada sector en las emisiones de GEI totales del país en la **Tabla 3.3** se logra extraer que el sector energético representó un 75% seguido del sector agrícola (11%), del sector residuos (7%), y finalmente del sector de procesos industriales y uso de productos (7%).

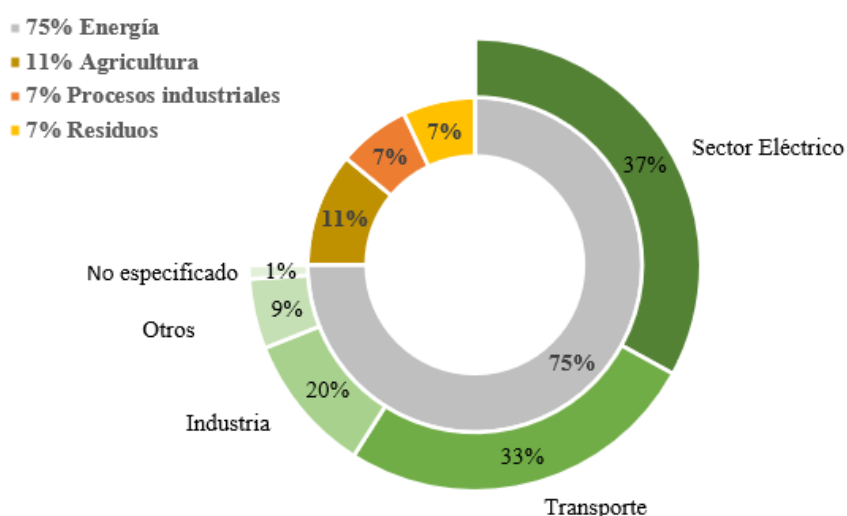


Figura 3.5 Emisiones de CO₂ eq. según el sector (Fuente: Primer inventario nacional de la calidad del aire, s.f.)

Tal como se aprecia en la **Figura 3.5**, el 75% correspondiente a Energía con 79.724 kt CO₂ eq. se subdivide en las categorías de **Industrias de la Energía** (37%), que considera las emisiones de GEI generadas por la quema de combustibles debido a las industrias de producción energética y de extracción de combustibles. Luego sigue **Transporte** (33%) la cual considera todas las actividades del transporte nacional (aéreo, terrestre, ferrocarriles, navegación y otros), excluyendo el transporte militar y el transporte internacional.

La siguiente categoría dentro del sector Energía es la **Industria manufacturera y de la construcción** (20%) que incluye las emisiones de GEI generadas por la quema de combustibles fósiles para la industria, incluyendo la quema para autogeneración de electricidad y calor para el uso propio de estas industrias, además del transporte dentro de las faenas. La extracción continua de cobre en esta industria ha ejercido una significativa influencia en la generación de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo, esto debido a que se ha visto impulsado por el crecimiento constante en la demanda internacional de cobre como materia prima. Finalmente, las categorías restantes comprenden un 9% correspondiente a **Otros sectores** y un 1% clasificado como **No especificado**. En el caso de "Otros sectores", esta categoría abarca las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en edificaciones comerciales e internacionales, en entornos residenciales, y en actividades vinculadas a la agricultura, silvicultura, pesca e industria pesquera.

3.2 Políticas de Mitigación y Descarbonización

La imperativa necesidad de abordar el cambio climático ha llevado a la implementación de políticas globales y nacionales que buscan mitigar las emisiones de GEI para un futuro más sostenible y descarbonizado. Este apartado se sumerge en el análisis de las políticas que rigen la mitigación de emisiones tanto a nivel internacional como en el marco regulatorio nacional de Chile. Al explorar los compromisos internacionales y el marco legal interno, se revela el panorama normativo que guía los esfuerzos hacia una economía más limpia y resiliente al cambio climático.

3.2.1 *Compromisos Internacionales*

En el escenario global, como ya se ha mencionado, el cambio climático se ha consolidado como uno de los mayores desafíos de nuestra era, trascendiendo fronteras y exigiendo una respuesta colectiva. En este contexto, el Acuerdo de París, forjado en la Conferencia de las

Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) en 2015, representa un compromiso sin precedentes de naciones de todo el mundo para combatir el calentamiento global y preservar la sostenibilidad del planeta.

El acuerdo establece objetivos a largo plazo como guía para todas las naciones:

- Reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2°C y esforzarse para limitar este aumento a incluso más de tan solo 1,5°.
- Revisar los compromisos de los países cada cinco años.
- Ofrecer financiación a los países en desarrollo para que puedan mitigar el cambio climático, fortalecer la resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático.

Este acuerdo ha estado en vigor desde el 4 de noviembre de 2016, y hasta la fecha, 194 países han firmado el Acuerdo de París, incluyendo a Chile. El acuerdo incluye compromisos de todos los países para reducir sus emisiones y colaborar a fin de adaptarse a los impactos del cambio climático, así como llamamientos a estos países para que aumenten sus compromisos con el tiempo. El acuerdo proporciona a los países desarrollados una ruta para que ayuden a las naciones en desarrollo a mitigar y adaptarse al cambio climático, creando un marco para el control y levantamiento de información transparentes sobre los objetivos climáticos de estos países.

Este acuerdo se implementa cada cinco años, con acciones de los países progresivamente más ambiciosas en materia climática y se espera que, cada cinco años, los países envíen un plan nacional actualizado de acción climática que se conoce como Contribución Determinada a Nivel

Nacional. En el año 2023, se llevará a cabo la primera evaluación a nivel global para medir los avances hacia los objetivos establecidos en el Acuerdo de París, en este proceso, se motivará aún más a los países a adoptar medidas climáticas significativas para mantener el calentamiento por debajo de 1,5 °C (Naciones Unidas, s.f.d.).

Tal como indica António Guterres, secretario general de las Naciones Unidas (2020), “mientras el mundo celebra el quinto aniversario de la aprobación del histórico Acuerdo de París sobre el cambio climático, se está forjando un prometedor movimiento en pro de la neutralidad en carbono”. En ese año 2020, países que representan más del 65% de los gases de efecto invernadero nocivos y más del 70% de la economía mundial se habrán comprometido a alcanzar emisiones netas cero para mediados del siglo. La perspectiva de la comunidad científica es clara, a menos que se reduzcan las producciones de combustible fósil en un 6% cada año de aquí a 2030, las cosas empeorarán.

Con motivo de este compromiso, la Unión Europea ha trazado una meta clave “Lograr la neutralidad de carbono para el año 2050”, a través de la implementación de la recién promulgada ley europea del clima. Este ambicioso esfuerzo cuenta con la participación de países como el Reino Unido, Japón, la República de Corea y otros 110 países, entre los que se incluye Chile.

En este escenario, cada nación, ciudad, entidad financiera y empresa se encuentra en la obligación de adoptar planes concretos para realizar la transición hacia emisiones netas cero. Es imperativo tomar medidas inmediatas para avanzar decididamente hacia el cumplimiento de este objetivo, que implica reducir las emisiones globales en un 45% para el año 2030 en comparación con los niveles registrados en 2010.

Para comprender mejor esta iniciativa, es esencial definir el concepto de neutralidad de

carbono. Se refiere a la situación ideal en la cual la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera es equitativa a la cantidad retirada por diversas vías, generando un equilibrio neto cero, este estado también es conocido como la huella cero de carbono (Parlamento Europeo, 2023).

3.2.2 *Marco Regulatorio Nacional*

Tras haber explorado el contexto internacional y los compromisos globales para abordar el cambio climático, es imperativo adentrarse en el ámbito nacional y comprender las políticas y el marco regulatorio que Chile ha implementado actualmente para enfrentarse a este desafío global.

En este sentido, la reciente promulgación de la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N°21.455) establece un marco jurídico para hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, con la finalidad de alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2050. Para alcanzar dicha meta de mitigación, la ley establece instrumentos de gestión a nivel nacional, regional y local, definiendo una institucionalidad ambiental específica para el cambio climático. En este sentido, asigna funciones y responsabilidades particulares a cada uno de los órganos nacionales, regionales y colaboradores, destacando al Ministerio del Medio Ambiente como la autoridad nacional en la materia. Además, crea un Sistema Nacional de Acceso a la información y participación ciudadana sobre el cambio climático, bajo la administración y coordinación del Ministerio del Medio Ambiente, y establece directrices y mecanismos financieros para abordar los retos climáticos. En último término, la ley realiza modificaciones en diversos cuerpos legales con el fin de ajustar el marco jurídico vigente a esta nueva normativa (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022).

Además de esto, los establecimientos que estén obligados a declarar a través del Sistema de Ventanilla Única del Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes (RETC) deberán

reportar, anualmente, las emisiones de GEI y forzantes climáticos de vida corta que generen. Se espera que el reglamento clarifique el alcance de las fuentes y emisiones que deben incluirse en dichos informes (Observatorio Del Principio 10, s.f.).

Tal como se mencionó anteriormente, Chile se ha comprometido en el marco de su “Contribución Nacional para el Acuerdo Climático de París de 2015”, reducir sus emisiones de GEI en un 30% por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) al año 2030, con respecto al año 2007. Para el cumplimiento de este compromiso el sector energético resulta fundamental, pues el 75% de las emisiones totales de GEI del país corresponden a este sector. Para lograr este desafío de forma responsable y de cara la ciudadanía, el Ministerio de Energía conformó la “Mesa de Retiro y/o Reconversión de Centrales a Carbón”, con el objetivo de analizar sus efectos sobre la seguridad y eficiencia económica del sistema eléctrico nacional, la actividad económica local y su impacto medioambiental.

El Plan de Descarbonización es un proyecto serio que busca equilibrar adecuadamente los tres pilares de la sustentabilidad, de manera de lograr el impacto ambiental deseado, pero a su vez resguardar la seguridad y eficiencia económica del sistema y las problemáticas sociales vinculadas a la pérdida de empleos en las comunas en donde están ubicadas estas centrales. Esta estrategia de descarbonización tiene como objetivo descarbonizar la matriz eléctrica al 100% para 2040 y la matriz total de energía para 2050, buscando aumentar la participación de energías renovables, fomentar la eficiencia energética y reducir las emisiones en sectores como transporte y construcción.

En adición a estas regulaciones, cabe destacar el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026, publicado en noviembre de 2021. Su objetivo fundamental radica en fomentar el uso

racional y eficiente de los recursos energéticos. La eficiencia energética, reconocida como la manera más segura, económica y sostenible de satisfacer nuestras crecientes necesidades energéticas, asume particular importancia en países en desarrollo como el nuestro, donde dichas demandas continúan expandiéndose. En su primer artículo, la Ley mandata la elaboración, cada cinco años, de un Plan Nacional de Eficiencia Energética, en colaboración con los ministerios sectoriales respectivos y con participación ciudadana.

Para dar cumplimiento a lo anterior, la propuesta de plan que se presenta es resultado de un trabajo colaborativo de la sociedad civil, la academia, la industria y el sector público. El objetivo del plan es proporcionar un marco estratégico para el desarrollo de la eficiencia energética de nuestro país y de esta manera, materializar el potencial ahorro energético que permita alcanzar la carbono neutralidad al año 2050. Este plan aborda los principales sectores que consumen energía en nuestro país, buscando llegar al sector industrial y minero, al transporte y a las edificaciones, con medidas específicas y metas ambiciosas (Ministerio de Energía, s.f.a).

El plan ha sido elaborado considerando diversas estrategias y planes que se han presentado por el Ministerio de Energía, las medidas se han dividido en 4 sectores los cuales son el Sector Productivo, Sector Transporte, Sector Edificaciones y el Sector Ciudadanía. Para cada uno de estos se han definido un conjunto de medidas y metas específicas las cuales son:

- Reducir la intensidad energética respecto al año 2019 en un 6% al año 2026, 15% al año 2030 y un 35% respecto al año 2050.
- Reducir en un 4% la intensidad energética de los grandes consumidores al año 2026 y reducir en un 25% al año 2050, ambos respecto del año 2021.

- Duplicar el rendimiento de los vehículos livianos nuevos que entran al país al año 2035 y cuadruplicar estos al año 2050, respecto del año 2019.
- Las nuevas viviendas lograrán un ahorro promedio de 30% en su demanda de energía térmica al año 2026 y un 50% al año 2050, respecto del año 2021.
- El 70% de las principales categorías de artefactos y equipos que se venden en el mercado corresponden a equipos energéticamente eficientes al 2035 y se planea que para el 2050 sea un 100% de los equipos.

Para velar por el cumplimiento de estas metas se plantea un mecanismo de seguimiento evaluación de las medidas establecidas en el plan, las cuales son clave para avanzar en el desarrollo de la eficiencia energética en el país.

Chile está dando un paso fundamental en sus compromisos de enfrentar el cambio climático, pues estas medidas representan la principal acción para cumplir sus compromisos de reducción de emisiones de GEI. En paralelo se está avanzando en muchos otros frentes, entre los que se pueden mencionar, el proceso significativo en materia de Electromovilidad, el fomento y la promoción de las Energías Renovables No Convencionales, el proyecto de Ley de Regulación de Biocombustibles Sólidos, la modernización de los mercados energéticos y de la institucionalidad energética, entre otros (Ministerio De Energía, s.f.b)

3.3 Contexto de la Industria Minera en Chile

La riqueza geológica de Chile ha situado a la industria minera como un pilar fundamental de su desarrollo económico. Este apartado aborda de manera integral la trascendencia de esta industria, no solo desde una perspectiva económica sino también ambiental. Al explorar su

evolución y su papel en la economía nacional, se revela un panorama completo que demanda una gestión equilibrada entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental. Gracias a su potencial geográfico, Chile es el primer productor de cobre y renio a nivel mundial, el segundo en litio y molibdeno y el sexto en plata.

3.3.1 Importancia Económica y Ambiental de la Industria Minera

La industria minera ha jugado un papel crucial en la configuración del paisaje socioeconómico de Chile a lo largo de los años y sus efectos determinan directamente variables como el crecimiento del PIB y del empleo, el tipo de cambio, la inversión, los ingresos fiscales, las exportaciones, entre muchos otros (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023).

Se estima que la actividad minera contribuye directamente con el 14,6% al PIB, pero al considerar los efectos multiplicadores en otras industrias, su aporte al PIB nacional se sitúa alrededor del 20%. Según las investigaciones disponibles, por cada US\$100 generados por la industria minera en la economía, se generan indirectamente al menos otros US\$36.

Estudios recientes apuntan a que, si bien la minería provoca un impacto económico en cifras como PIB per cápita, remuneraciones e inversión a nivel local, los efectos positivos en materia social como vivienda, educación, salud y pobreza en las regiones mineras son heterogéneos y no estaría siendo adecuadamente proporcional a los recursos generados.

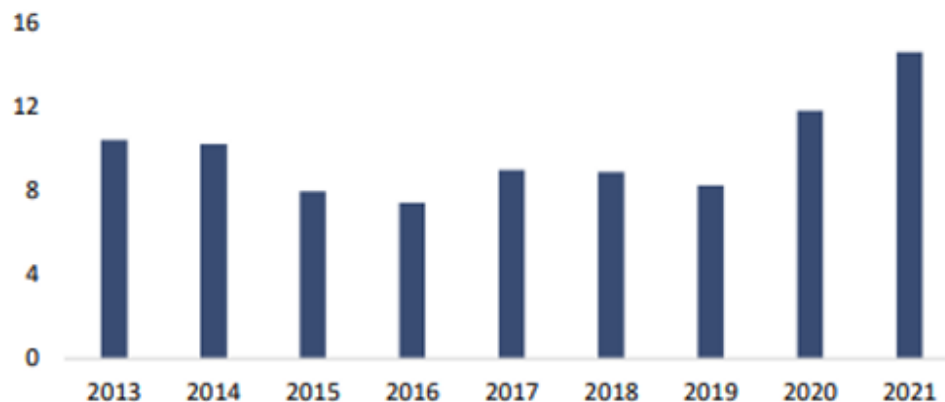


Figura 3.6 *Participación de la minería en el PIB (porcentaje) (Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile-Impactos socioeconómicos de la minería en Chile, 2023).*

La dinámica en la inversión de mediano y largo plazo en nuestro país también se encuentra estrechamente relacionada con lo que acontece en la industria minera. De cada 7 pesos invertidos localmente, 1 peso se destina a la minería

A pesar de la disminución en la ley del material, es decir, la cantidad obtenida por cada tonelada de roca procesada cada año, las proyecciones sugieren que, de las 5.6 millones de toneladas de cobre producidas en 2021, la producción podría aumentar a más de 8 millones de toneladas a partir de 2026 si se llevan a cabo todos los proyectos planificados. Además, la minería mantiene su posición como el principal receptor de Inversión Extranjera Directa (IED) en Chile, representando el 29% del total invertido durante el período 2012-2020, seguido por los servicios financieros (17%).

A pesar de los beneficios económicos que la minería aporta al país, no se debe pasar por alto su considerable impacto ambiental. Estos proyectos mineros, que atraviesan diversas fases desde la exploración del mineral metálico hasta el cierre minero, conllevan una serie de impactos

ambientales y efectos negativos en el entorno. Entre ellos se encuentra el "impacto sobre el suelo", que resulta en la pérdida de horizontes edáficos, cambios en la morfología del lugar debido a la extracción de materiales, pérdida de estabilidad de taludes, erosión y desertificación.

Asimismo, se observa un "impacto ambiental" generado por la emisión de gases a la atmósfera y la producción de polvo durante operaciones como maquinaria, perforaciones, tronaduras y transporte de materiales. Además, se registran impactos sobre las aguas, la flora y fauna, así como el valor paisajístico del lugar (GRN, 2017).

3.3.2 Consumo de Energía y Emisiones en la Minería Chilena

La extracción y procesamiento de minerales demanda una cantidad significativa de energía, colocando al sector minero como un actor clave en el panorama energético nacional. Este apartado se sumerge en las estadísticas de consumo energético y las emisiones asociadas a la minería chilena.

Según el Balance Nacional de Energía 2020, realizado por el Ministerio de Energía, el consumo final de energía corresponde a la energía destinada a los distintos sectores consumidores de la economía nacional que hacen uso de ésta ya sea con fines energéticos como no energéticos. Su representación típica es mediante la matriz energética secundaria la cual en el año 2020 tuvo un consumo final de 283.384 TCal (Tera calorías), un 6% menor que en el año 2019. De este valor el sector Minero representa un 18% del total con 51.009 TCal, tal como se muestra a continuación.

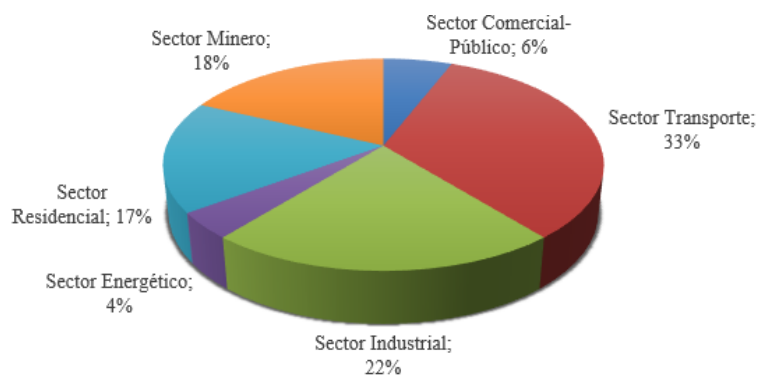


Figura 3.7 Consumo de energía de Chile en el 2020 (Fuente: Elaboración propia a partir del Balance Nacional de Energía 2020.)

En el año 2020, la energía eléctrica fue consumida principalmente por el sector minero (36%), esta cifra revela la magnitud de la dependencia energética de la minería.

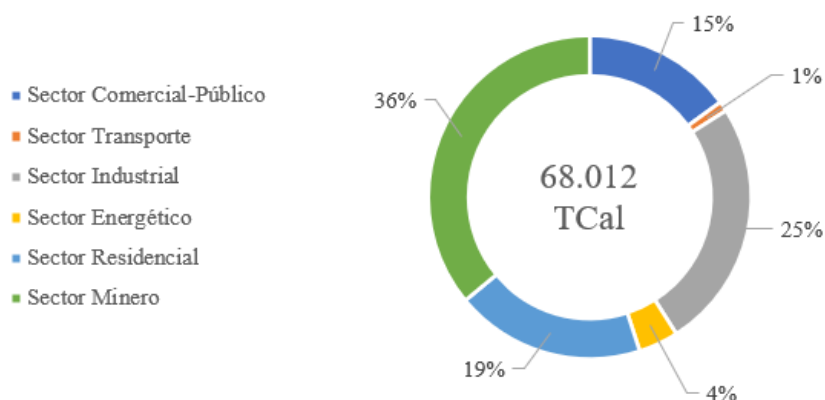


Figura 3.8 Consumo de electricidad por sector en el 2020 (Fuente: Elaboración propia a partir del Balance Nacional de Energía 2020).

Dentro del consumo energético del sector Minero, la industria del cobre es la que aporta la participación más alta, con un 80%, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.4: Consumo Energético en el sector Minero en TCal

Sector Minería	Consumo Energético
Cobre	40.806
Salitre	2.040
Hierro	1530
Minas varias	6.631
Total	51.008

Fuente: Elaboración propia a partir del Balance Nacional de Energía, 2020.

El consumo de energía del sector minero mencionado anteriormente también puede subdividirse en Combustibles y en la electricidad. En la **Figura 3.8** se presenta la composición del consumo energético en Combustibles, destacando, como ya se mencionó, que la Electricidad es el componente más influyente.

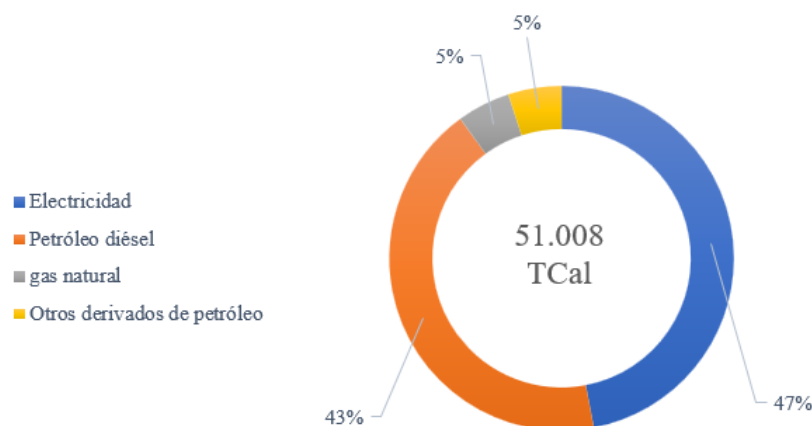


Figura 3.9 Consumo de Energía en Combustibles y Electricidad (Fuente: Elaboración propia a partir del Balance Nacional de Energía 2020).

Debido a estos requerimientos energéticos altos de la industria minera, motivada por sus procesos intensivos, impone una huella ambiental considerable en forma de emisiones de gases de efecto invernadero. Estos procesos, que involucran la combustión de combustibles fósiles, especialmente el diésel, contribuyen directamente a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

uno de los principales responsables del calentamiento global, además de otros gases.

Según el último informe disponible de emisiones de GEI en la minería del cobre publicado por COCHILCO en 2022, durante el año 2021 se registraron emisiones de Gases de Efecto Invernadero por un total de 17.016 kilotoneladas de CO₂ eq, distribuidas en 6.305 por GEI directos (37,1% del total de emisiones de la minería del cobre) y 10.710 por GEI indirectos (62,9% del total). Dentro del consumo por tipo de combustible y su consecuente estimación de emisiones directas, se observa que el Diésel es responsable del 90,8% de las Emisiones Directas de la minería del cobre, seguido por el Gas natural (5,3%) y el Enap (3,1%).

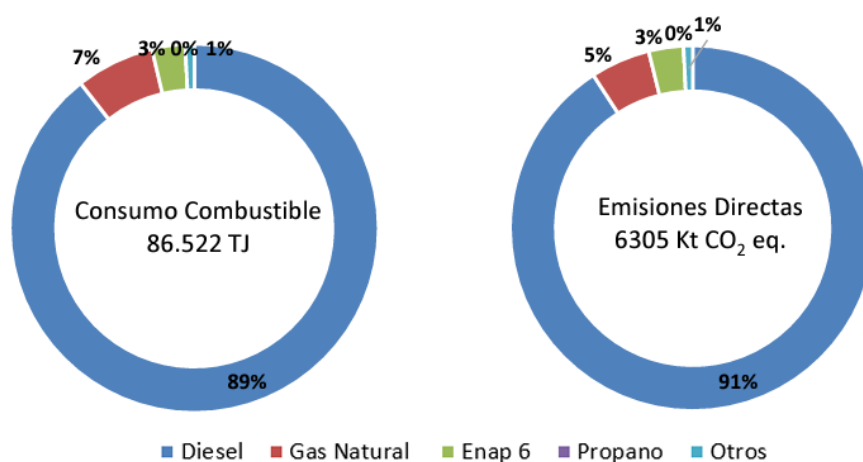


Figura 3.10 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustible (Fuente: Informe de actualización de emisiones de GEI, Comisión Chilena del Cobre 2022).

Es importante señalar que, el valor de Consumo de Combustible se expresa en la unidad de medida TJ, que cuantifica la energía utilizada por un camión en operaciones mineras. Generalmente, se indica en litros por cada 100 kilómetros.

En cuanto a los procesos de la minería del cobre, la mayor cantidad de demanda de

combustible y por ende de emisiones directas se atribuye a la extracción desde la mina rajo abierto, representando el 79,7% de las emisiones directas de GEI con 5.026 kilotoneladas de CO₂ eq. El combustible más utilizado en el proceso mina rajo abierto es el diésel (99,9% del total), ya que es el principal insumo de los camiones extractores de mineral y que tiene un alto nivel de emisión de CO₂ eq.

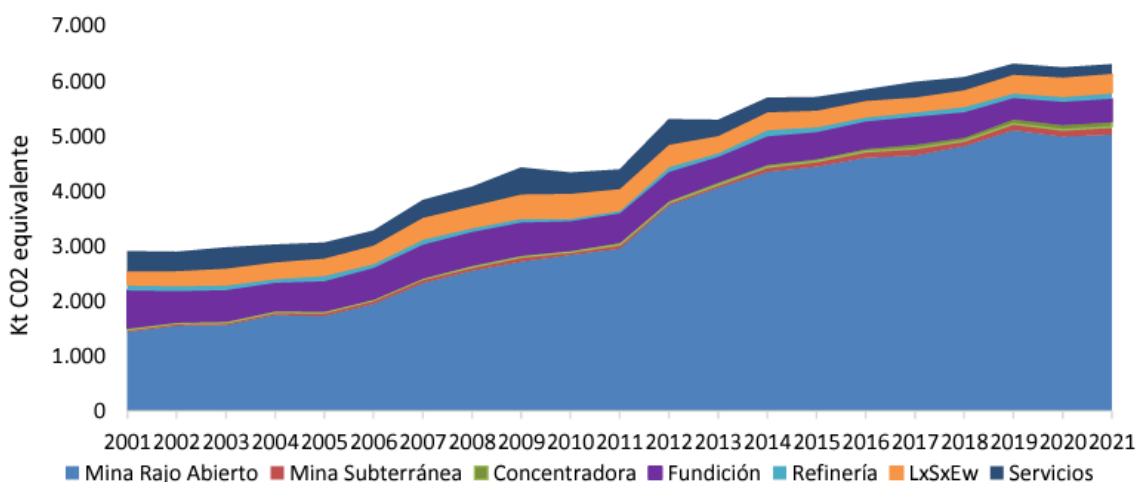


Figura 3.11 Emisiones de GEI directos por proceso (Fuente: Informe de actualización de emisiones de GEI, Comisión Chilena del Cobre 2022).

COCHILCO menciona que, a pesar de esto, el acelerado desarrollo de la tecnología de hoy ha permitido el ingreso de la electromovilidad en la actividad minera y también de tener camiones que utilicen hidrogeno verde, combustible que Chile podría producir a partir de energía solar, abriendo un conjunto de opciones a la gran minería en materia económica y ambiental.

3.3.3 Rol Fundamental de los CAEX: Propósito y Funcionalidad

El transporte y el almacenamiento, tanto en la planta como en tránsito, desempeñan un papel fundamental en la logística de distribución, especialmente en la industria minera. Dada la mayor complejidad de los procesos operativos en esta industria, gran parte de la actividad se centra

en los procesos de abastecimiento y traslado de minerales. Por esta razón, la carga y el transporte de esta se destacan como dos de las operaciones más cruciales, abarcando el traslado de materias primas, insumos y materiales desde los proveedores, entre distintas áreas de operación, así como el transporte de productos en proceso o terminados hacia clientes o puntos de embarque para la exportación.

Dentro del entramado operativo de la industria minera chilena, los camiones de Extracción y Acarreo (CAEX) desempeñan un rol insustituible. Su propósito principal radica en la extracción eficiente de minerales desde los yacimientos hasta los centros de procesamiento, siendo el eslabón vital en la cadena de producción. Estos vehículos, equipados con tecnología avanzada, no solo transportan grandes volúmenes de materiales, sino que también operan en condiciones adversas propias de entornos mineros. Cabe destacar que el traslado de material concentrado mediante camiones de carga se presenta en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso y la Región Metropolitana, cuyo destino finalmente es hacia el punto de embarque para la exportación.

En términos de funcionalidad, los CAEX son diseñados para maximizar la productividad y eficiencia en el proceso de extracción y transporte de minerales. Su capacidad de carga, velocidad y resistencia son aspectos críticos que impactan directamente en la rentabilidad y competitividad de la industria minera. Sin embargo, este desempeño eficiente va de la mano con desafíos significativos, como el consumo intensivo de combustibles fósiles, que representa una parte sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector.

El análisis detallado del propósito y la funcionalidad de los CAEX permite comprender la complejidad logística de la minería y destaca la necesidad urgente de abordar su impacto

ambiental. La elección de la fuente de energía para estos vehículos no solo incide en la eficiencia operativa, sino que también presenta una oportunidad estratégica para la industria minera chilena. La transición hacia tecnologías más sostenibles, como el hidrógeno verde, se posiciona como un paso crucial para equilibrar la demanda económica con la responsabilidad ambiental, impulsando así la evolución hacia una minería más ecoeficiente y sostenible.

3.4 Hidrógeno Verde Como Combustible

El hidrógeno, el elemento más simple y abundante en el universo, compuesto por un solo protón y un electrón, ha emergido como una poderosa herramienta en la lucha contra el cambio climático. Su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha generado un creciente interés en su aplicación en diversos sectores de la economía.

Una de las aplicaciones más destacadas del hidrógeno es su uso como combustible. Los vehículos de pila de combustible, como automóviles y autobuses, aprovechan el hidrógeno como fuente de energía para alimentar motores eléctricos, generando cero emisiones dañinas para el medio ambiente. Sin embargo, su utilidad va más allá de la movilidad sostenible; el hidrógeno desempeña un papel crucial en la industria química, siendo un componente esencial en la producción de amoníaco, metanol y una variedad de productos químicos. Además, se emplea en la refinación de petróleo para eliminar impurezas y mejorar la calidad de los combustibles.

Esta versatilidad del hidrógeno lo convierte en una opción atractiva para la transición hacia una economía más limpia y sostenible. Su capacidad para alimentar sistemas de energía limpia y su amplia gama de aplicaciones industriales lo posicionan como una herramienta clave en la búsqueda de soluciones para mitigar el cambio climático y promover un desarrollo más sostenible.

3.4.1 *Tecnologías Emergentes y Actuales*

Es importante destacar que, a diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno no se encuentra en estado libre en el planeta, sino que se halla mayormente combinado en compuestos como el agua o la mayoría de los compuestos orgánicos. Por lo tanto, es fundamental desarrollar sistemas capaces de producirlo de manera eficiente y sostenible.

Según un informe de ICEX España Exportación e Inversiones publicado en 2022, el 96% de la producción mundial de hidrógeno proviene actualmente de fuentes fósiles. De este porcentaje, el 48% se obtiene mediante el reformado de gas natural, el 30% mediante el reformado de petróleo, el 18% a través de la gasificación del carbón, mientras que solo el 4% proviene de la electrólisis del agua. Esta distribución resalta la necesidad de avanzar hacia métodos de producción de hidrógeno más limpios y sostenibles, como la electrólisis utilizando energías renovables.

La electrólisis es la alternativa que no proviene de combustibles fósiles, pero es más costosa. Este es un proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad, en ella ocurre la liberación de electrones por los aniones en el ánodo (una oxidación) y la captura de electrones por los cationes en el cátodo (una reducción). Este proceso se lleva a cabo en una clase importante de celdas electroquímicas que se conocen como celdas electrolíticas, donde se usa una corriente eléctrica para activar una reacción no espontánea, como resultado, los dos elementos del agua (hidrógeno y oxígeno) se separan.

La evolución de las tecnologías de producción de hidrógeno refleja un cambio significativo de soluciones de carbono positivo a soluciones de carbono neto cero. La industria ha pasado de los métodos convencionales de reformado de gas de síntesis o metano, asociados con las emisiones de carbono, a tecnologías avanzadas que aprovechan fuentes renovables como la solar y la

hidroeléctrica para la producción de hidrógeno. En particular, el radar de innovación para el hidrógeno verde destaca las tecnologías emergentes, como los electrodos fotocatalizadores y la división electroquímica del agua, que prevé sean innovaciones impactantes a largo plazo (De Aragón, 2024).

Estos métodos de producción del hidrógeno han dado lugar a una nomenclatura de colores que se utilizan para referirse a él y a lo sostenible que haya sido su proceso de extracción. Según la escala de colores que se ve a continuación:



Figura 3.12 *Tipos de hidrógeno diferenciados por su tipo de producción (Fuente: Ah2V Biobío s.f.)*

El hidrógeno gris se obtiene a través del reformado de combustibles fósiles, siendo el gas natural el más utilizado en este proceso. Aunque es el tipo de hidrógeno más económico de producir en la actualidad, su proceso de obtención emite una cantidad significativa de CO₂ a la atmósfera, lo que lo convierte en una opción poco sostenible desde el punto de vista ambiental.

En contraste, el hidrógeno azul también se deriva de combustibles fósiles, pero se utiliza tecnología de captura y almacenamiento de carbono para mitigar las emisiones de CO₂ asociadas con su producción. Aunque es menos contaminante que el hidrógeno gris, sigue generando emisiones durante su proceso de producción, lo que limita su impacto ambiental reducido solo a las emisiones del proceso y no a su total eliminación.

Por último, el hidrógeno verde, también conocido como hidrógeno renovable, se obtiene a través de la electrólisis del agua, utilizando exclusivamente energía renovable para alimentar el proceso. Esta característica lo hace completamente libre de emisiones contaminantes, convirtiéndolo en la opción más limpia y sostenible de todas las formas de hidrógeno.

El hidrógeno es atractivo como combustible ya que destaca por su alto valor calorífico, liberando una cantidad de energía significativamente mayor que otros combustibles conocidos durante su combustión. Por ejemplo, la quema de un gramo de hidrógeno produce aproximadamente 2,8 veces más energía que la misma masa de gasolina (Stefanelli, 2017).

3.5 Ventajas de Chile para la Producción de Hidrógeno Verde

3.5.1 Chile, un País Potencia en Energía Renovable

Chile se destaca como un líder regional en la producción de energía renovable, aprovechando su abundancia de recursos naturales y su compromiso por la transición hacia una matriz energética más sostenible. Con un vasto potencial en energía solar, eólica y geotérmica, el país ha experimentado un rápido crecimiento en la capacidad instalada de energías limpias en los últimos años. Este desarrollo ha posicionado a Chile como un importante pilar en el panorama global de la energía renovable y ha sentado las bases en la exploración de nuevas oportunidades, como la producción de hidrógeno verde.

Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde publicado por el Ministerio de Energía en noviembre de 2020, Chile en 6 años ha quintuplicado su capacidad de generación de esas fuentes de energía renovable y se proyecta que, al 2030, hasta el 70% de su matriz eléctrica sea renovable. La creciente inversión en estas energías, así como en almacenamiento y en

infraestructura de transmisión, es una señal inequívoca de una transición decidida a un sistema eléctrico más sostenible.

En el norte de Chile, se registra la radiación solar más intensa del mundo, lo que permite alcanzar factores de planta del 35% en plantas fotovoltaicas monofaciales con seguimiento en un eje. En comparación, el promedio mundial de factores de planta para centrales solares fotovoltaicas fue del 11% en 2020, y en Estados Unidos, este promedio se situó en torno al 20% entre 2018 y 2020. Por otro lado, la generación solar en la zona central de Chile es altamente competitiva en comparación con la generación eléctrica a partir de energía fósil. Esta ventaja se ve potenciada por su proximidad a grandes centros de consumo, redes de gas y centros logísticos portuarios y viales. Además, en el extremo austral de Chile, los vientos terrestres y marítimos proporcionan una excelente fuente de energía eólica. Las turbinas eólicas de 120 metros de altura pueden alcanzar factores de planta superiores al 60% en tierra, equiparables a las turbinas off-shore de otros países. Mientras que, a nivel mundial, el promedio de factores de planta para la energía eólica ronda el 20%, con variaciones desde el 18% en Italia hasta el 33% en Estados Unidos (Ministerio de Energía, 2022).

Según Ricardo Lagos, expresidente de Chile, los últimos diez años han sido cruciales para el avance de las energías limpias en el país. En 2011, la capacidad instalada de energías renovables no convencionales (ERNC) era de 540 megavatios (MW), una cifra que ha experimentado un crecimiento exponencial desde entonces. Este progreso ha sido destacado como un salto cuántico en el desarrollo energético nacional.

Klaus Schmidt-Hebbel, economista y profesor chileno, añade que Chile posee ventajas competitivas significativas en términos de costos de energía renovable. Las regiones del Norte

presentan factores de planta de 33-35% en la producción de energía solar, mientras que en el Sur se alcanzan factores de planta de 65-75% en la producción de energía eólica. Con un suministro de energía limpia y económica, Chile no solo podrá satisfacer su demanda interna de hidrógeno verde, sino que también estará en posición de exportarlo. Esto ofrecerá al mundo una fuente de energía versátil, utilizable en la generación eléctrica, sistemas de calefacción y refrigeración, redes de gas, industrias siderúrgicas y motores, entre otros usos.

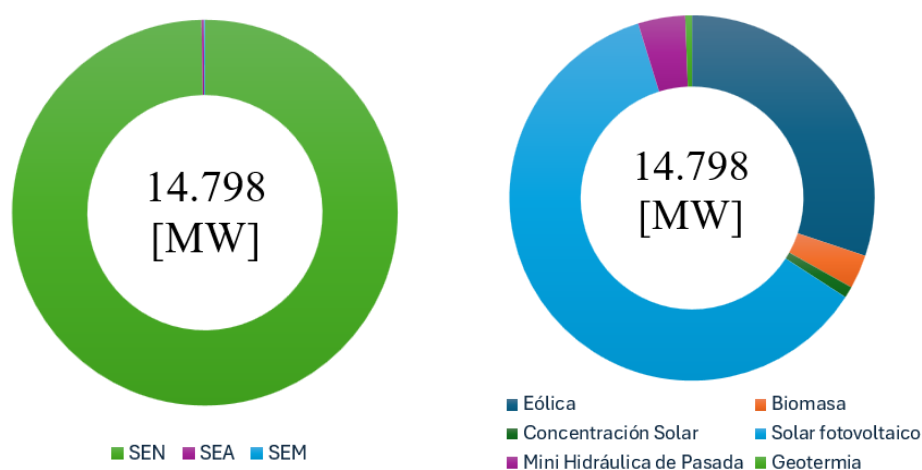


Figura 3.13 Capacidad Instalada Neta de Generación Eléctrica (Fuente: Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía CNE 2024).

Según el último reporte mensual de energía renovable no convencional publicada por la comisión nacional de energía en marzo de 2024, la potencia instalada con base a tecnologías ERNC, a febrero de 2024, asciende a un total de 14.798 [MW], de dicho valor 14.756 [MW] se ubican en el sistema eléctrico nacional, 30 [MW] en el sistema eléctrico de Aysén y 12 [MW] en el sistema eléctrico de magallanes. De esto la capacidad ERNC instalada corresponde a un 44,2% de la capacidad eléctrica total en los sistemas eléctricos nacionales.

De los 14,798 megavatios [MW] de capacidad instalada de Energías Renovables No

Convencionales (ERNC), el 61.1% corresponde a energía solar fotovoltaica, el 30.1% a energía eólica, el 4.2% proviene de energía minihidráulica de pasada, el 3% es de energía de biomasa, el 1% de concentración solar y el 0.6% de energía geotérmica.

Respecto a la generación eléctrica en el sistema eléctrico nacional (SEN), la generación fue de 7.015 [GWh] durante el mes de febrero de 2024. De este valor, 2.748 [GWh] son atribuibles a la producción de las centrales ERNC.

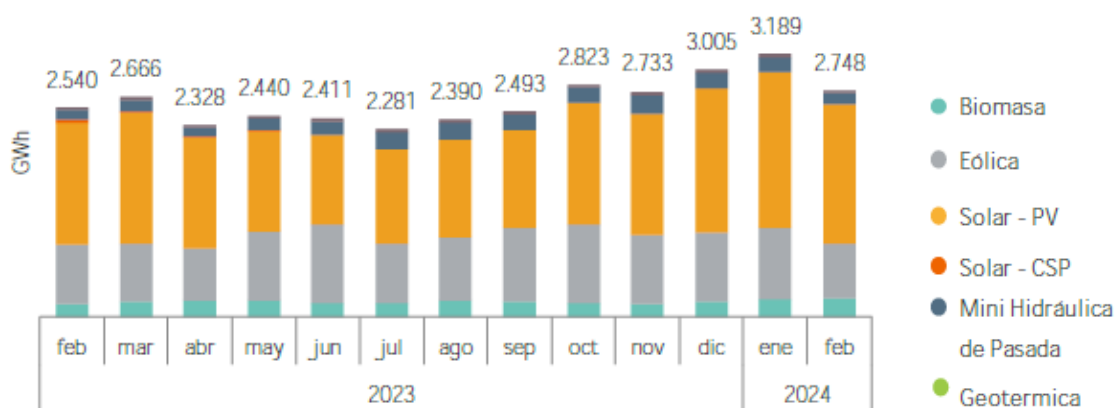


Figura 3.14 Evolución de la Generación Bruta de Energía Eléctrica ERNC (Fuente: Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía CNE 2024).

Como puede observarse en la **Figura 3.14**, y al desglosar por tecnología, es posible notar que del total de generación un 61,5% (1.690 [GWh]) fue solar fotovoltaica, 24,3% (667 [GWh]) de generación eólica, 4,7% (129 [GWh]) de generación proveniente de centrales minihidráulicas de pasada, 8,3% (229 [GWh]) de inyección en base a centrales biomasa y 1,2% (33 [GWh]) de generación geotérmica. Como se ha mencionado previamente, el país disfruta de la mayor radiación solar del planeta, lo que explica el predominio de la generación de energía solar fotovoltaica.

3.5.2 *Comparación Energética, Costos y Emisiones con Combustibles fósiles*

La comparación entre el uso de hidrógeno verde y combustibles fósiles emerge como un aspecto fundamental para evaluar la viabilidad y los beneficios de una matriz energética más limpia y sostenible. En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, el hidrógeno verde se destaca como una alternativa limpia y de bajo impacto ambiental. Al producirse utilizando energía renovable, su ciclo de vida puede ser prácticamente libre de emisiones de GEI. En contraste los combustibles fósiles, especialmente el carbón, el petróleo y el gas natural, liberan grandes cantidades de CO₂ y otros contaminantes durante su extracción, procesamiento y combustión, lo que contribuye significativamente al calentamiento global y la contaminación atmosférica.

La implementación del hidrógeno como combustible destaca por su notable capacidad energética, superando ampliamente a los combustibles convencionales tanto en estado líquido como gaseoso. Como se ha señalado, su alto valor calorífico es evidente: un kilogramo de hidrógeno libera aproximadamente tres veces más energía que la gasolina. La **Figura 3.15** ofrece una comparativa energética que abarca todas las facetas del hidrógeno en relación con una variedad de combustibles comúnmente empleados en las industrias nacionales.

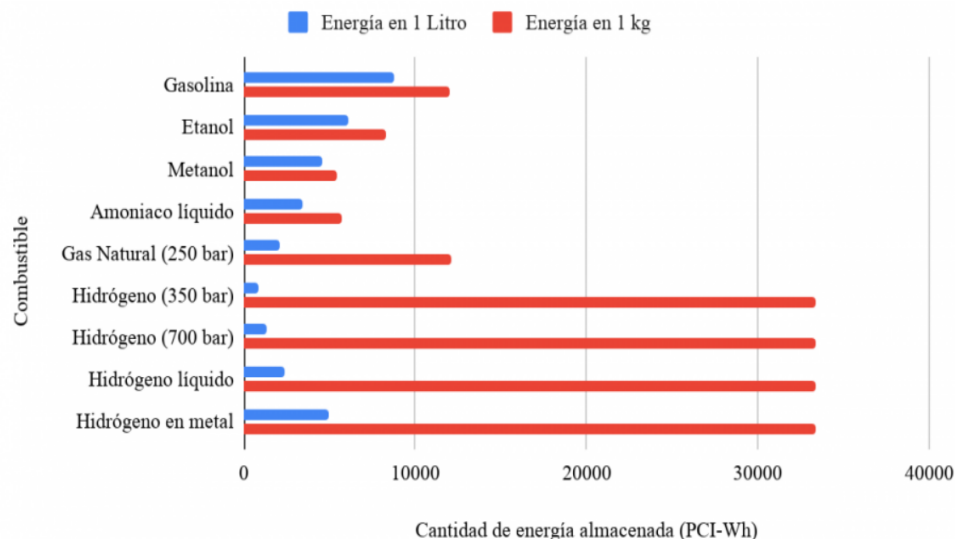


Figura 3.15 Energía contenida en distintos combustibles por cada unidad de kilo y litro

(Fuente: Hidrógeno Verde, Generadoras de Chile, s.f.).

Según el informe "Hidrógeno Verde: un Proyecto País" presentado por el Ministerio de Energía en 2022, el continuo aumento en la utilización de energías renovables ha posicionado al hidrógeno verde (H2V) como la opción más económica para la generación de electricidad en muchos países, incluido Chile. Aunque hasta ahora su producción no ha sido competitiva, con costos que oscilan entre 3,0 y 7,5 USD por kilogramo, superando significativamente al hidrógeno producido a partir de gas natural, cuyos costos se sitúan entre 0,9 y 3,2 USD por kilogramo. Sin embargo, se prevé que para el año 2025, especialmente impulsado por proyectos como el de Magallanes en Chile, los costos podrían reducirse a 1,1 - 1,2 USD por kilogramo en el sur y 1,2 - 1,4 USD por kilogramo en el norte, lo que supondría una notable competitividad de precios. Las proyecciones tecnológicas realistas dicen que para el año 2030 el precio del H2V chileno será de 0,95 – 1,05 [US\$/kg], tanto en el norte como en el sur, consolidando a Chile como el país productor más barato del mundo (Ministerio de Energía, 2022).

Uno de los principales desafíos actuales se enfoca en la implementación y el aprendizaje

práctico para reducir los costos de los electrolizadores y optimizar la logística de la cadena de suministro. Por ejemplo, el transporte de hidrógeno tiene un costo entre 1,5 y 5 veces mayor que el equivalente para el gas natural, y además, experimenta pérdidas significativas de energía desde su producción hasta su conversión final. Según la Administración de Información Energética (EIA) en 2019, la instalación de electrolizadores en áreas con una excelente disponibilidad de recursos renovables podría convertirse en una opción de suministro de bajo costo para el hidrógeno, incluso después de considerar los costos de transmisión y distribución hacia los usuarios finales.

Bajo esta premisa, se destacan regiones con condiciones favorables debido a sus bajos costos en sistemas fotovoltaicos híbridos y eólicos. Entre estas áreas se incluyen Chile (con una abundancia de energía eólica en el sur y solar en el norte), Nueva Zelanda, África del Norte, el Medio Oriente, Mongolia, la mayor parte de Australia, y ciertas áreas de China y Estados Unidos.

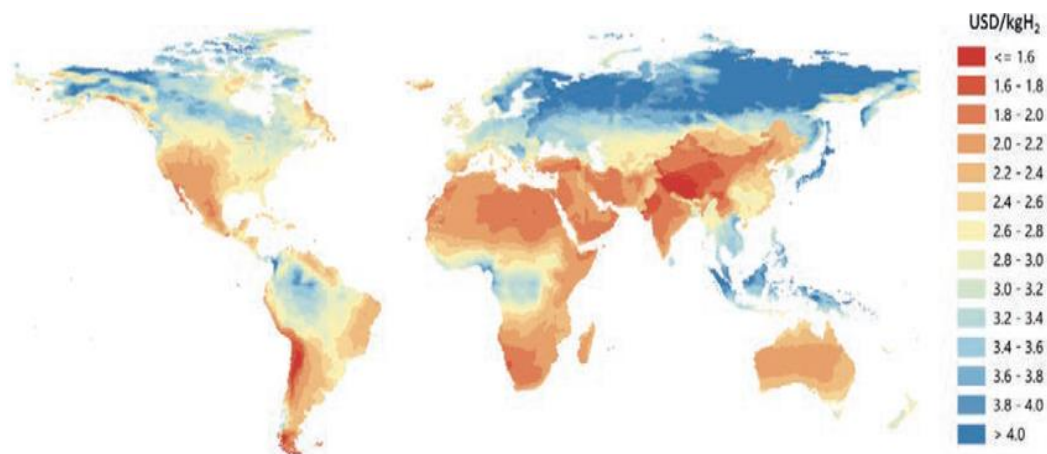


Figura 3.16 Costo de producción del H₂ a partir de energía solar FV y eólica a largo plazo

(Fuente: IEA, 2019)

Como se logra apreciar en la **Figura 3.16** se prevé que para el 2030 Chile esté en el tramo inferior de costos (zona roja), equivalente a un valor menor a 1,6 [US\$ /kg].

3.5.3 *Hidrógeno Verde en la Industria Minera*

El sector minero en Chile, reconocido internacionalmente por su importancia en la economía del país, enfrenta desafíos constantes en busca de soluciones innovadores y sostenibles para mejorar su eficiencia y reducir el impacto ambiental. En este contexto, el H2V ha surgido como una potencial herramienta disruptiva que podría revolucionar la forma en que la industria minera aborda sus necesidades energéticas en el transporte de carga.

En las regiones norte y sur de Chile se vislumbra un gran potencial para la producción de hidrógeno, un recurso que podría desempeñar un papel crucial en la mitigación de las emisiones GEI asociadas a la industria minera. En el año 2021, el 90,8% de estas emisiones se atribuyó al uso de diésel. Específicamente en la minería del cobre, los procesos que más destacan por su consumo de diésel (99,9% del total de combustibles usados en mina rajo) se encuentran en las minas a cielo abierto, especialmente en el transporte de carga y extracción de mineral.

Ante este panorama, surge la necesidad de evaluar la viabilidad de incorporar el hidrógeno como combustible en camiones de extracción y equipos mineros. Esta evaluación incluye considerar la posibilidad de utilizar motores diésel-hidrógeno o sistemas de pilas de combustible alimentadas por hidrógeno, lo que permitiría un funcionamiento completamente eléctrico.

En este contexto, diversas empresas del sector minero han tomado medidas proactivas para abordar esta problemática. Codelco, la principal productora de cobre a nivel mundial, ha unido fuerzas con la Alianza Komatsu GHG para avanzar hacia un transporte de carga cero emisiones, como parte de su compromiso con la neutralidad de carbono para el año 2050. Este esfuerzo se traduce en la eliminación progresiva del uso de diésel en los camiones de extracción. Para enfrentar

este desafío, la empresa ha establecido una serie de compromisos para el año 2030 en materia de desarrollo sustentable. Entre estos compromisos destaca la meta de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 70% (Cabello, 2022).

Con el objetivo de alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI), Codelco ha unido fuerzas con otras dos iniciativas destinadas a acelerar la innovación en la búsqueda de camiones mineros con emisiones cero. Estas iniciativas son el "Desafío Charge On" y la iniciativa "Innovación para vehículos más limpios y seguros" del Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM). Todas estas alianzas tienen como objetivo avanzar en la principal fuente directa de emisiones de GEI en la industria minera. La empresa estatal se ha fijado metas claras y mensurables a corto plazo, con tres focos principales de acción que también están alineadas con los desafíos recientemente definidos en la COP26: transitar hacia una matriz eléctrica 100% limpia, lograr que todas las operaciones subterráneas sean 100% electrificadas, reducir las emisiones de sus camiones de extracción minera y participar activamente en el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, como el hidrógeno verde, entre otras. (Meneses, 2022).

El mercado de los camiones de extracción en la minería del cobre nacional es dominado ampliamente por 2 empresas que suman una participación del 95%: Caterpillar y Komatsu. Sin embargo, el segmento de camiones con capacidad de carga superior a las 200 toneladas es liderado por Komatsu. De acuerdo con un estudio de H2 Chile, un camión de CAEX de la minería consume diariamente 3.600 litros de diésel, generando emisiones anuales de 5.000 toneladas de CO₂ por camión. Si consideramos que en la industria minera chilena existen 1.500 camiones, las emisiones contaminantes pueden alcanzar más de 7 millones de toneladas de CO₂ (Jurídica, 2022).

En 2021, Komatsu y varios de sus clientes en la industria minera se unieron para establecer la Alianza de Gases de Efecto Invernadero de Komatsu, un acuerdo destinado a impulsar la electrificación en el sector mediante la colaboración en el desarrollo de vehículos e infraestructuras. El primer objetivo concreto de esta alianza fue dar continuidad al concepto de camión minero existente de Komatsu. Se trata de un estudio sobre un vehículo de transporte que puede funcionar con diversas fuentes de energía: un sistema híbrido diésel-eléctrico, una línea aérea electrificada o un sistema eléctrico alimentado por batería o celda de combustible de hidrógeno.

Bajo esta misma línea, General Motors y Komatsu han anunciado la firma de un acuerdo de colaboración para el diseño, desarrollo y validación conjunta de un sistema de pila de combustible de hidrógeno destinado al 930E, un camión minero con una altura de 7,4 metros (14 metros con la caja elevada) y una capacidad de carga de 320 toneladas, propulsado por un motor diésel de 3.500 CV y 18 cilindros. Se tiene la intención de poner a prueba este prototipo a mediados de la década de 2020 en las instalaciones de investigación y desarrollo de Komatsu en Arizona Proving Grounds. Este camión minero prototipo estará impulsado por un sistema de más de 2MW basado en la tecnología Power Cubes de Hydrotec (García, 2023).

En 2022, la empresa Anglo American inicia pruebas en terreno de su innovador camión híbrido a baterías e hidrógeno, conocido como NuGen. Este proyecto pionero se lleva a cabo en la mina Mogalakwena de Sudáfrica, propiedad de Anglo American. El sistema en desarrollo consta de varios subsistemas, siendo el principal un camión CAEX diésel de la marca Komatsu 930E de 290 toneladas, modificado para funcionar exclusivamente con hidrógeno. Además, cuenta con un módulo de potencia híbrido de 2 MW que impulsa esta tecnología revolucionaria.

4 Metodología

4.1 Análisis de Aspectos Técnicos de los Camiones CAEX

4.1.1 Identificación de Componentes Clave y Tecnologías Disponibles

Como en la industria minera la mayoría de los camiones con capacidad de carga superior a 200 toneladas son de la marca Komatsu, se usará como referencia un CAEX de esta marca, específicamente el Komatsu 930E-4 teniendo una capacidad de carga de 200 toneladas, se encuentran operativos entre 17 a 18 horas por día, el resto del tiempo se encuentran detenidos por algún contratiempo o mantenimiento. Mensualmente las flotas de camiones transportan un aproximado de 13.000 kTon, consumiendo un aproximado de 115.530 L de diésel mensualmente.



Figura 4.1 CAEX 930E

El camión 930E es un camión tolva, para uso fuera de carretera, de volteo hacia atrás con sistema de mando eléctrico AC. El peso bruto del vehículo es de 1.100.000 lbs. (498.960 kg). El motor es un Komatsu SSDA16V160 de capacidad nominal 2700 HP (2014 kW).

Tabla 4.1: *Especificaciones del sistema eléctrico*

Modelo	Komatsu SSSDA16V160
Combustible	Diésel
Capacidad de estanque Gasolina	4542 L
Número de cilindros	16
Ciclo operativo	4 ciclos
Potencia de frenado nominal	2014 kW @1900 rpm
Poder al volante	1902 kW @1900 rpm
Peso	9608 kg

Fuente: *Elaboración propia a partir de la ficha técnica Komatsu 930E.*

La rueda motorizada GDY-106, empleada en el camión, desempeña varias funciones esenciales: actúa como eje del vehículo, transmisión y motor de tracción AC. La energía eléctrica se suministra al motor de tracción AC, el cual, al girar, transfiere la fuerza de rotación a través del eje de transmisión al portador de engranajes de alta velocidad. Este impulsa al portador de engranajes de baja velocidad, que se conecta al tubo de torsión y, finalmente, al cubo de la rueda. Es este movimiento rotatorio el que propulsa el vehículo, haciendo girar los neumáticos montados en el cubo de la rueda.

Tabla 4.2: *Especificaciones motor de combustión*

Alternador	GTA-41
Soplador en línea de doble impulsor	340 m ³ /min
Control	AC Torque control System
Ruedas motorizadas	GDY106 Induction Traction Motors
Velocidad (máximo)	64,5 km/h

Fuente: *Elaboración propia a partir de la ficha técnica Komatsu 930E.*

En el sistema de frenado dinámico, que constituye el principal método de reducción de

velocidad, la energía mecánica generada por el movimiento del camión se transforma en energía eléctrica por medio del motor de tracción de AC. Esta energía eléctrica se libera como calor a través de las rejillas de resistencia de frenado, lo que permite desacelerar el vehículo.

La energía eléctrica producida por el alternador alimenta dos motores de rueda situados en la caja del eje trasero. Estos motores de inducción de AC trifásicos operan con una energía de onda completa de AC. Cada motor, junto con su propio inversor, se conecta en paralelo a través de la salida rectificadora del alternador. Los inversores son responsables de convertir el voltaje rectificado en AC, alternando entre la conexión y desconexión del voltaje DC aplicado.

El control del voltaje y la frecuencia de salida de AC se ajusta para lograr un deslizamiento y una eficiencia óptimos en los motores de tracción. A bajas velocidades, el inversor funciona como un modulador de amplitud de pulso (PWM), mientras que a velocidades más altas actúa como un modulador de onda cuadrada, permitiendo la conversión del voltaje DC en AC. El voltaje en el enlace DC, que es la salida del rectificador del alternador principal, oscila entre 600 V y 1400 V durante la propulsión, y entre 600 V y 1500 V durante el frenado.

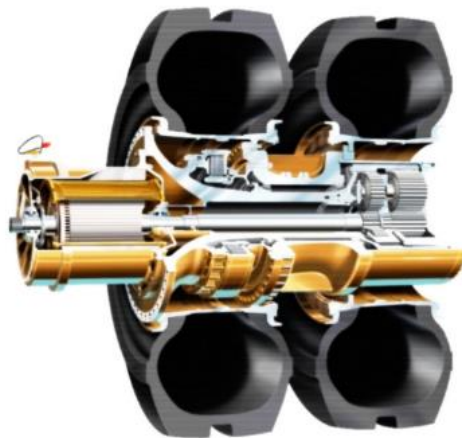


Figura 4.2 *Motor de tracción de inducción G DY106*

Ya mencionado los sistemas en los cuales los camiones CAEX hacen uso del combustible para generar energía y llevar su funcionamiento de manera correcta, es importante mencionar que, debido a los elevados niveles de contaminación generados por este tipo de motores, algunas mineras han decidido implementar la adopción de nuevas tecnologías que le permitan migrar progresivamente a una minería más responsable con el cuidado del medio ambiente. Se plantea generar un cambio en el sistema de potencia de los camiones, de esta forma se busca eliminar el uso de motores de combustión interna. La alternativa de la utilización y generación de energía se ha posicionado como la principal solución para el cambio.

Dado que aún se encuentra en fase de investigación el desarrollo de camiones eléctricos que cumplan con los rigurosos requisitos de potencia de los CAEX, se sugiere la implementación de dos nuevas fuentes de energía para estos vehículos. La primera propuesta, de aplicación a corto plazo, consiste en la integración de un sistema de asistencia de potencia trolley, el cual suministra corriente directamente a los camiones en los puntos donde se requiere un mayor impulso. Por otro lado, la segunda alternativa implica una transición gradual de los sistemas de propulsión diésel hacia sistemas híbridos eléctricos H2-Diésel.



Figura 4.3 Camión CAEX asistido por sistema trolley

4.1.2 *Evaluación de Consumo Energético*

En la evaluación del consumo energético de los camiones CAEX, es fundamental considerar diversas variables que influyen directamente en su eficiencia operativa. Según el estudio publicado en 2017 por la Universidad del Bío-Bío llamada “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta”, se identifican variables clave que impactan significativamente en el consumo de combustible de estos vehículos de gran tonelaje.

La geometría de la ruta juega un papel crucial en el consumo energético de los camiones CAEX. Factores como las pendientes, los radios de curvatura y la resistencia a la rodadura influyen en la cantidad de combustible requerida para desplazarse por el terreno. Rutas con pendientes pronunciadas o curvas cerradas pueden aumentar el consumo de combustible debido al esfuerzo adicional necesario para superar estos obstáculos.

La aceleración y la potencia del motor también son variables determinantes en el consumo. Las aceleraciones bruscas pueden aumentar significativamente el consumo de combustible, ya que requieren una mayor cantidad de energía para mover el vehículo desde una posición estática y por otro lado motores con mayor potencia pueden ofrecer un rendimiento óptimo en términos de eficiencia, permitiendo al camión desplazarse de manera más eficiente y consumir menos combustible en el proceso.

Por último, la cantidad de carga transportada por los camiones es la variable más influyente respecto a la cantidad de consumo de combustible. Cuanto mayor sea la carga que transporta el vehículo, mayor será la cantidad de energía requerida para moverse, por esto es importante encontrar un equilibrio entre la carga transportada y la eficiencia operativa para maximizar la

productividad y minimizar el consumo de combustible.

Para un análisis general de los datos se escoge en un inicio una ruta en específico, donde el camión CAEX se desplaza subiendo una pendiente hacia el chancador, el eje x de la **Figura 4.4** describiendo la distancia recorrida por un camión cargado que es de aproximadamente 2058 km. La curva que representa la línea verde describe el movimiento del camión, este se desplaza hacia el chancador subiendo alrededor de 120 m en el eje z. La línea roja representa la velocidad admisible por el camión, en donde la velocidad límite fue de alrededor de 14 m/s y finalmente la línea azul representa la velocidad desarrollada en el trayecto.

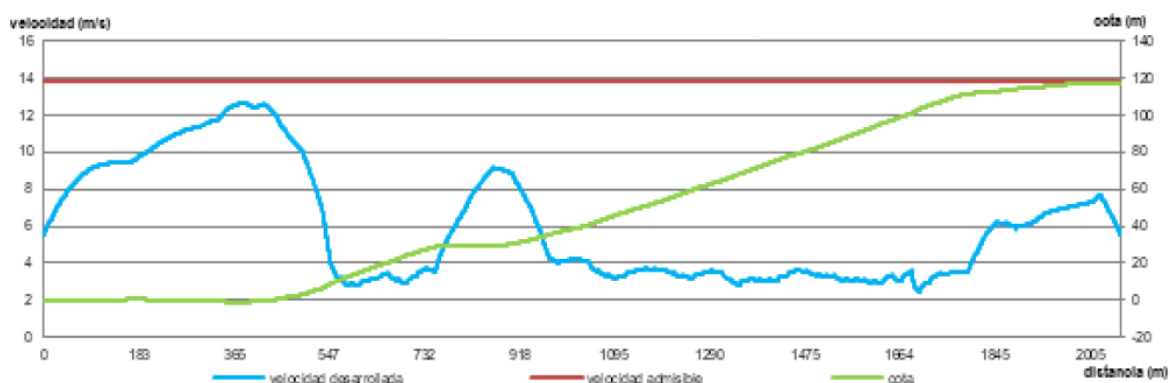


Figura 4.4 *Velocidad admisible y desarrollada en el camión cargado (Fuente: Universidad del Bío-Bío, “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta, 2017.)*

Durante el trayecto analizado, se evidencian reducciones progresivas en la velocidad del camión, atribuidas al aumento del porcentaje de pendiente en segmentos específicos del recorrido. Se observa que la pendiente se presenta en tramos definidos por distancias de 327 metros y 817 metros, respectivamente. Posteriormente, esta pendiente continúa desde los 918 metros hasta aproximadamente los 1800 metros.

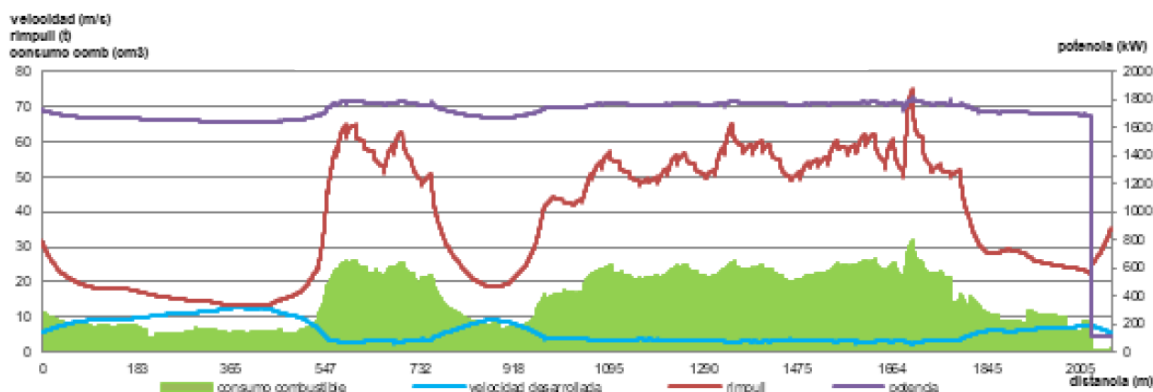


Figura 4.5 Consumo de combustible, velocidad desarrollada, rimpull y potencia (Fuente: Universidad del Bío-Bío, “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta, 2017.”)

En la **Figura 4.5**, se muestra la relación entre el consumo de combustible, la fuerza de tracción disponible en las ruedas (la fuerza que impulsa el movimiento en el punto de contacto entre la rueda y el terreno) y la velocidad del camión a lo largo de la ruta. Se puede observar que el consumo de combustible del camión está directamente relacionado con la fuerza de tracción. Esta conexión se explica por el hecho de que la fuerza de tracción determina la capacidad del camión para desplazarse y vencer la resistencia al avance.

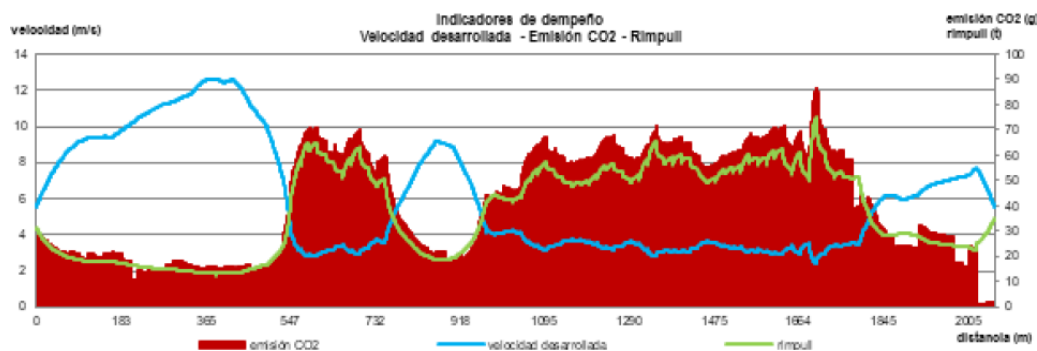


Figura 4.6 Emisión de CO₂, velocidad desarrollada, rimpull en el camión cargado (Fuente: Universidad del Bío-Bío, “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta, 2017.”)

mineros, mediante simulación discreta, 2017.)

En la **Figura 4.6** se presenta la evolución de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) a lo largo de una ruta, en relación con la velocidad desarrollada y el rimpull. Se observa que la emisión de CO₂ sigue un patrón similar al indicador de desempeño asociado al consumo de combustible, lo que sugiere una relación directa entre ambos.

En áreas donde la geometría de la ruta impone mayores demandas al camión, como indicado por las caídas en la velocidad desarrollada, se registra un aumento en la emisión de CO₂ al ambiente, con excepción del tramo final de la ruta. Específicamente, durante la operación de traslado de mineral ascendiendo unos 120 metros en el eje z, se consume un total de 762,3 MJ de energía, lo que equivale a la quema de aproximadamente 85,9 litros de combustible y la generación de 232,5 kg de CO₂.

En un estudio más específico para las 24 horas de operación modeladas se obtuvieron los siguientes datos para el consumo de combustible, energía y toneladas de dióxido de carbono, descritos en la **Tabla 4.3**. La operación minera se dividió en tres sectores de carga, para lo cual en el primer sector se tiene una distancia de 1,7 km y 6 camiones asignados, en el segundo sector se tiene una distancia de 2 km y 4 camiones asignados y para el tercer sector una distancia de 1,8 km y 6 camiones asignados.

Tabla 4.3: Indicadores de desempeño del camión CAEX en distintos sectores

Áreas	Camión	Consumo de Combustible (litros)			Ciclos	l/hr	Energía (TJ)	Ton CO2	kg CO2/litro
		Ruta	Ralenti	Total CC					
Sector 1	1	3596	532	4128	42	172.01	0.1446	10.7	2.59
	2	3673	520	4193	34	174.71	0.1482	11.0	2.62
	3	3616	537	4153	38	173.03	0.1460	10.8	2.60
	4	3417	511	3929	39	163.69	0.1372	10.2	2.59
	5	3291	492	3783	39	157.63	0.1336	9.9	2.62
	6	3304	496	3801	39	158.36	0.1336	9.9	2.60
	Total	20898	3089	23986	231	***	0.8433	62.49	***
Sector 2	7	5440	397	5838	61	243.23	0.2148	15.9	2.73
	8	5565	424	5988	58	249.51	0.2192	16.2	2.71
	9	5466	408	5874	61	244.76	0.2154	16.0	2.72
	10	5591	415	6007	56	250.28	0.2203	16.3	2.72
	Total	22063	1644	23707	236	***	0.8697	64.4	***
Sector 3	11	2365	739	3104	42	129.33	0.0943	7.0	2.25
	12	2356	754	3111	36	129.61	0.0940	7.0	2.24
	13	2321	735	3057	39	127.36	0.0924	6.8	2.24
	14	2239	726	2965	42	123.53	0.0893	6.6	2.23
	15	2341	725	3066	42	127.76	0.0934	6.9	2.25
	16	2222	729	2951	35	122.96	0.0885	6.6	2.22
	Total	13846	4408	18253	236	***	0.6619	40.9	***

Fuente: Universidad del Bío-Bío, “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta, 2017.

La relación entre la cantidad de dióxido de carbono generado por litro de combustible consumido y la variación en el eje z de la ruta a transitar, junto con la energía utilizada, muestra una relación similar pero distinta en diversos sectores de la ruta. En la operación cotidiana de transporte de mineral y lastre, carga y descarga de camiones durante 24 horas, se generaron aproximadamente 168 toneladas de CO₂.

Basándonos en este dato y suponiendo que los camiones CAEX en la industria minera tienen rutas comparables, podemos estimar que cada camión genera alrededor de 10,5 toneladas de CO₂ en un día de trabajo, con un consumo de 4.122 litros de combustible diésel. Este análisis resalta la relevancia de comprender y gestionar las emisiones de CO₂ asociadas a las operaciones de transporte, especialmente en sectores industriales intensivos en energía como la minería.

4.2 Demanda de Combustible en el Escenario Actual

4.2.1 *Análisis de Consumo de Diésel en la Industria Minera*

Para establecer una base sólida en el análisis del consumo de diésel en la industria minera chilena, es crucial definir el escenario actual. Utilizando la base de datos de la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP), se obtienen las proyecciones de emisiones de CO₂ en la industria minera, expresadas en megatoneladas.

Como se expuso en el apartado 3.3.2, la mayor demanda de combustible y, por ende, las emisiones directas en la industria minera se deben a la extracción de minerales en minas a cielo abierto, que representan el 79,7% de las emisiones totales. En este tipo de operaciones, el combustible predominante es el diésel, que constituye el 99,9% del consumo total, siendo el principal insumo para los camiones de extracción (CAEX).

Estos datos son fundamentales para estimar la demanda energética de diésel desde 2020 hasta 2050. Basándose en esta información, se transforman las megatoneladas de dióxido de carbono correspondientes a las emisiones de la industria minera en terovatio-hora (TWh) utilizando las **equivalencias (4.1), (4.2)** y **las ecuaciones (4.3), (4.4)**. Permitiendo obtener una proyección de demanda energética hasta 2050. El poder calorífico del petróleo diésel, es decir, la densidad energética que aporta este combustible es de 10,30 kWh/litro. Esta conversión es crucial para calcular con precisión la demanda energética proyectada y evaluar las necesidades de combustible de la industria minera en los próximos años.

$$1 \text{ Mton CO}_2\text{eq} = 10^9 \text{ kg CO}_2\text{eq} \quad (4.1)$$

$$1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ kWh} \quad (4.2)$$

$$\text{Litros Diésel Requeridos} = \frac{\text{Emisiones de CO}_2 \times 0,797}{\text{Factor de conversión}} \quad (4.3)$$

$$\text{Demanda energética} = \text{Litros Diésel Requeridos} \times \text{Poder calorífico Diésel} \quad (4.4)$$

Según el estudio detallado en el apartado 4.1.2, se analiza el rendimiento de los camiones de extracción durante 24 horas de operación, divididos en tres sectores de carga distintos. Este análisis permite obtener diferentes factores de conversión (kg CO₂ /litro) específicos para cada camión CAEX. En promedio, se determina que el factor de conversión es de aproximadamente 2,5 kg de CO₂ por litro de diésel consumido.

Este valor promedio será utilizado como referencia en los cálculos de la estimación de demanda de combustible. La obtención de este factor de conversión involucra la evaluación de las emisiones generadas por los camiones en diferentes condiciones operativas y niveles de carga. Al desglosar las operaciones en sectores de carga, se logra una comprensión más precisa de como varía el consumo de diésel y las emisiones de CO₂ asociadas, permitiendo un cálculo más exacto de la demanda energética futura.

Usando las conversiones y ecuación detalladas, se obtiene la demanda en Terawatt-hora (TWh).

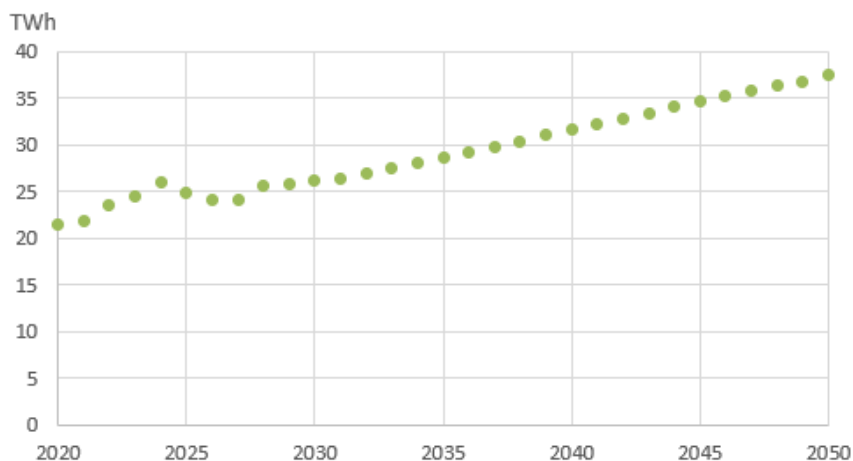


Figura 4.7 *Proyección de la demanda energética de diésel en el sector mina rajo abierto*
(Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la PELP del Min. de Energía).

En la **Figura 4.7** se observa una tendencia ascendente significativa en la demanda energética desde el año 2020 hasta alcanzar un máximo en 2024. Posteriormente, la demanda muestra una ligera disminución hasta 2027, seguida de un crecimiento constante y sostenido desde 2028 hasta 2050. A continuación, se presentan datos detallados de la estimación de la demanda para algunos años considerados en el estudio.

Tabla 4.4: *Proyección de la demanda energética de diésel en mina rajo abierto*

Año	Demanda (TWh)
2020	21,56
2025	24,98
2030	26,15
2040	31,65
2050	37,50

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados por la PELP del Min. de Energía.

Utilizando la ecuación (4.3) de la metodología y considerando una densidad energética de 10,30 kWh/litro, se calcula la cantidad de diésel necesaria en litros para satisfacer el consumo energético proyectado. Según el análisis realizado en el apartado 4.1.2, los camiones CAEX consumen 4.122 litros de diésel al día, lo que equivale a 1.504.530 litros al año. La **Tabla 4.5** presenta la cantidad de diésel consumido en relación con el número de camiones utilizados.

Tabla 4.5: *Diésel requerido para la demanda energética y número de CAEX que abastecen*

Año	Consumo diésel (millones de litros)	Camiones CAEX
2020	2093	1391
2025	2425	1612
2030	2539	1687
2040	3073	2042
2050	3641	2420

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, actualmente se está estudiando e implementando un sistema trolley para los camiones CAEX. Este proyecto de implementación del sistema trolley se enmarca en una estrategia para reducir emisiones y costos operativos, mejorando la eficiencia energética.

Las siguientes 2 imágenes muestran un diagrama que compara el perfil de consumo de energía de un camión de minería en una ruta antes y después de la implementación de un sistema trolley. La ruta se divide en cuatro puntos (A, B, C, D) y se describe el tiempo y consumo de energía en cada tramo.

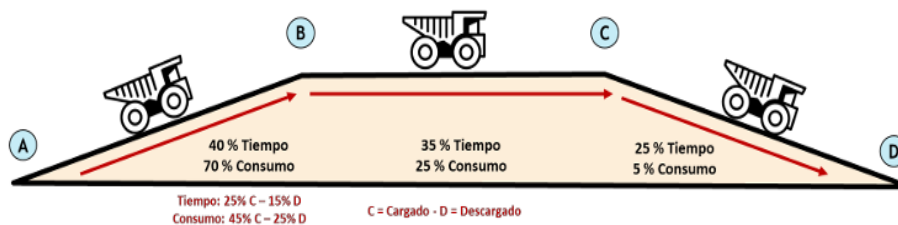


Figura 4.8 Consumo actual sin trolley (Fuente: *Sistemas trolley de la minera los pelambres, 2022*).

En la **Figura 4.8**, se presenta el consumo de energía en el escenario actual, sin la implementación del sistema trolley. En el tramo A-B, que representa el ascenso del camión cargado, se observa que el 40% del tiempo total del ciclo se consume en esta sección, representando un 70% del consumo total de diésel. Este alto consumo energético se debe al esfuerzo considerable necesario para subir con la carga completa.

El tramo B-C, que es relativamente plano, requiere el 35% del tiempo total del ciclo y representa el 25% del consumo de diésel. Aunque el camión sigue cargado en este tramo, la demanda de energía es menor en comparación con el ascenso. Finalmente, en el tramo C-D, donde el camión desciende descargado, el consumo de diésel se reduce drásticamente al 5% del total, consumiendo solo el 25% del tiempo del ciclo.

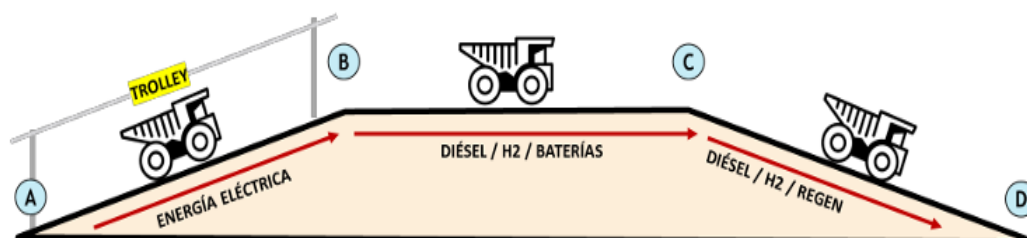


Figura 4.9 Consumo con sistema trolley (Fuente: *Sistemas trolley de la minera los pelambres, 2022*).

En la **Figura 4.9**, se presenta el perfil de consumo de energía tras la implementación del sistema trolley. En el tramo A-B, el camión utiliza energía eléctrica proporcionada por el sistema trolley, este cambio permite sustituir el 95% del consumo diésel con electricidad, con solo un 5% del consumo residual en ralentí del motor diésel. La energía eléctrica reduce significativamente tanto los costos operativos como las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para el tramo B-C, se consideran diferentes fuentes de energía, como diésel, hidrógeno o baterías. Esta flexibilidad en la elección de la tecnología depende de la disponibilidad y los avances tecnológicos, siempre buscando la reducción adicional de emisiones. En el tramo C-D, también se proponen estos 3 tipos de fuentes de energía.

El sistema trolley ofrece numerosos beneficios. En primer lugar, permite un ahorro significativo en costos operativos al comparar el consumo energético de diésel con el de kWh, con una relación de reemplazo estimada de 1 litro de diésel por 10,3 kWh. En segundo lugar, el sistema incrementa la velocidad en subidas en más del 50%, utilizando la máxima potencia de los motores eléctricos, que tienen 5.400 HP (Caballos de fuerza) en comparación con los 2.700 HP de un motor diésel. Además, se produce una notable reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, proporcional a la disminución en el uso del diésel.

No obstante, entre los diversos desafíos destaca el elevado costo de electrificar completamente la mina, lo que requiere una estrategia cuidadosa en la selección de rampas y en la garantía del suministro eléctrico. Otro desafío importante es el riesgo de obsolescencia de la alta inversión requerida, ya que el sistema trolley debe ser compatible y servir como complemento para cualquier tipo de propulsión, ya sea diésel, baterías o hidrógeno.

4.3 Demanda de Hidrógeno en un Escenario Alternativo

4.3.1 Proyección de Demanda de Hidrógeno Verde para la Minería

La proyección y estimación de la demanda de hidrógeno verde considera su uso final en camiones CAEX con motores de combustión interna reacondicionados para operar con tecnología de combustión dual diésel-hidrógeno, manteniendo la misma eficiencia que los motores tradicionales.

La elección de esta opción sobre las celdas de combustible alimentadas con hidrógeno se debe a varios factores clave. En primer lugar, los camiones de extracción utilizados en la minería son de alto tonelaje y tienen grandes requerimientos de potencia. Reacondicionar un motor diésel es significativamente más económico que instalar nuevas celdas de combustible, y el mantenimiento es más económico debido a la familiaridad del personal técnico con la tecnología diésel.

En segundo lugar, esta opción es compatible con la infraestructura actual de suministro y almacenamiento de diésel, permitiendo una transición gradual sin necesidad de renovar completamente las instalaciones. Los motores duales también ofrecen flexibilidad, permitiendo el uso de diésel cuando el suministro de hidrógeno es limitado. Además, la implementación de motores duales es más rápida, permitiendo una reducción inmediata de emisiones. Los motores diésel son conocidos por su robustez y confiabilidad en condiciones operativas extremas, características que se mantienen en los sistemas duales. Aunque las celdas de combustible son más eficientes en teoría, los motores duales optimizados pueden alcanzar una buena eficiencia operativa y reducir significativamente las emisiones en comparación con los motores diésel puros.

Para el escenario alternativo de demanda de hidrógeno se determinan las siguientes

consideraciones:

- (1) Según la estrategia nacional de hidrógeno verde, se espera que la introducción del hidrógeno verde crezca progresivamente en el mercado chileno. Las estimaciones indican que para el 2025, la participación será del 1%; para el 2030, aumentará al 5%; en el 2040, alcanzará el 23%; y para el 2050, llegará al 33%. Basándose en estos valores proporcionados por la estrategia nacional, se ha realizado una proyección de la demanda de hidrógeno en Mina Rajo para el periodo comprendido entre 2025 y 2050.
- (2) Para utilizar el hidrógeno como combustible, se implementará la tecnología dual, reacondicionando motores de combustible existentes para que funcionen de manera híbrida con una mezcla de diésel e hidrógeno.
- (3) El poder calorífico del hidrógeno es 33,33 kWh/kg. Utilizando este valor, es posible calcular los kilogramos necesarios de hidrógeno con la siguiente ecuación:

$$\text{Kilogramos de hidrógeno} = \frac{\text{demanda energética}}{\text{densidad energética hidrógeno}} \quad (4.5)$$

- (4) Para la modelación de la alternativa dual, se utiliza la proporción especificada en el estudio realizado por Implementa Sur para CORFO, que propone una mezcla del 60% de hidrógeno y el 40% de diésel. Esta proporción permite determinar cuántos camiones CAEX pueden ser reacondicionados con la cantidad de hidrógeno estimada para el período 2025-2050, facilitando así la comparación con el escenario actual.

A partir de la proyección estimada en el punto anterior (4.2.1), se asumirá que la demanda energética de hidrógeno será equivalente a la de diésel al utilizar motores duales. No obstante, el reemplazo del diésel se realizará de manera progresiva, siguiendo la proyección de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.

Con los datos obtenidos sobre el porcentaje de incorporación de hidrógeno necesarios para satisfacer el consumo energético estimado, se procederá a realizar un gráfico que ilustre el comportamiento proyectado de la demanda de hidrógeno entre los años 2025 y 2050. Este gráfico, denominado **Figura 4.10**, permitirá visualizar la tendencia y el crecimiento progresivo en el porcentaje de hidrógeno como combustible en la industria minera, facilitando el análisis comparativo con el escenario actual

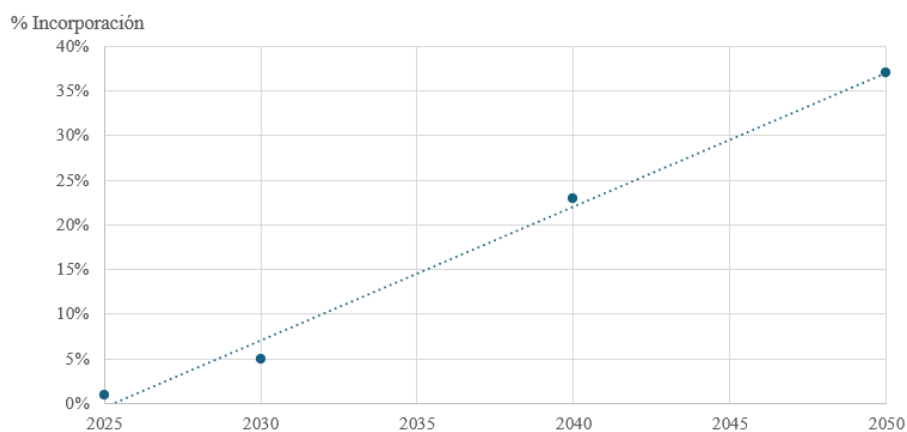


Figura 4.10 *Proyección del porcentaje de incorporación de hidrógeno para cubrir requerimientos energéticos en el sector mina rajo abierto (Fuente: Elaboración Propia).*

La **ecuación (4.6)** representa la línea de tendencia del gráfico mostrado, esta ecuación permite calcular el porcentaje de incorporación de hidrógeno en la industria a lo largo de los años, para luego poder transformarlas a energía aportada en TWh y de esta forma poder obtener cuantos camiones CAEX pueden ser usados con motores duales entre los años 2025 a 2050.

$$I_H = 0,01461129 * A - 29,5844476 \quad (4.6)$$

Donde I_H representa la incorporación de hidrógeno en porcentaje para cada año de estudio, A. Para determinar la cantidad de camiones que funcionarían con hidrógeno, se considera que un CAEX que opere mediante tecnología dual, con un motor que requiera un aporte energético del 40% de diésel y 60% de hidrógeno, necesitará anualmente 601,812 litros de diésel y 278,968 kilogramos de hidrógeno. A partir de estos datos y considerando las toneladas de hidrógeno proyectadas para los años 2025, 2030, 2040, y 2050, la **Tabla 4.6** muestra la cantidad anual de camiones que pueden ser reacondicionados para funcionar con esta tecnología.

Tabla 4.6: *Cantidad de camiones con motor tradicional y motor dual*

Año	Camiones tecnología dual	Camiones tradicionales
2020	0	1391
2025	9	1603
2030	215	1472
2040	758	1285
2050	1487	933

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 4.7** se presenta la proyección del consumo energético de hidrógeno, considerando las correspondientes tasas de incorporación calculadas con la **ecuación (4.6)**.

Tabla 4.7: *Estimación de demanda energética de hidrógeno como combustible*

Año	% Incorporación de hidrógeno	TWh
2025	0,34%	0,085
2030	7,65%	2,00
2040	22,26%	7,05
2050	36,87%	13,83

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el poder calorífico del hidrógeno junto con la **expresión (4.2)** y la **ecuación (4.5)**, es posible determinar la cantidad de toneladas de hidrógeno para satisfacer el consumo de energía estimado.

Tabla 4.8: *Estimación de toneladas de hidrógeno como combustible en Mina Rajo*

Año	% Incorporación de hidrógeno	Toneladas de hidrógeno
2025	0,34%	2.564
2030	7,65%	59.997
2040	22,26%	211.377
2050	36,87%	414.823

Fuente: Elaboración propia

La tabla a continuación presenta un resumen comparativo de la demanda energética y el consumo de combustible en el escenario actual y en el escenario alternativo propuesto, considerando los años 2025, 2030, 2040 y 2050. Para cada año, se detalla la energía requerida en TWh, el consumo de diésel en millones de litros, y la cantidad de camiones CAEX en operación con motores tradicionales y motores duales (40% diésel y 60% hidrógeno). Además, se incluye el consumo de hidrógeno en toneladas para el escenario alternativo. Este análisis permite evaluar la transición progresiva hacia el uso de hidrógeno verde en la industria minera y, al compararlo con el escenario actual, subraya los beneficios potenciales en términos de reducción de emisiones y eficiencia energética.

Tabla 4.9: Resumen de ambos escenarios para los años 2025, 2030, 2040 y 2050

Año	Escenario actual (solo diésel)			Escenario Alternativo (40% diésel - 60% hidrógeno)				Escenario Alternativo (motor combustión)	
	Energía Requerida (TWh)	Millones de Litros	Camiones	Participación hidrógeno	Cantidad H2 dual (ton)	Millones de litros diésel dual	Cantidad equipos motor dual	Millones de litros diésel	Cantidad equipos motor combustión
2025	24,98	2.425	1.612	0,342%	2.564 (Aportan 0,085 TWh)	5,53 (Aportan 0,057 TWh)	9	2.411 (Aportan 24,84 TWh)	1.603
2030	26,15	2.539	1.687	7,65%	59.997 (Aportan 2,00 TWh)	129,43 (Aportan 1,33 TWh)	215	2.215 (Aportan 22,81 TWh)	1.472
2040	31,65	3.073	2.042	22,26%	211.377 (Aportan 7,05 TWh)	455,99 (Aportan 4,70 TWh)	758	1.932 (Aportan 19,91 TWh)	1.285
2050	37,50	3.641	2.420	36,87%	414.823 (Aportan 13,83 TWh)	894,89 (Aportan 9,22 TWh)	1.487	1.403 (Aportan 14,46 TWh)	933

Fuente: Elaboración propia

4.4 Evaluación de la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

El objetivo de esta iniciativa es establecerse como una medida de mitigación destinada a reducir los gases de efecto invernadero y, de este modo, avanzar hacia la meta de carbono neutralidad para el año 2050. Por lo tanto, es esencial cuantificar la disminución de emisiones que resultaría de la implementación de esta propuesta.

Como se menciona en el Marco Teórico, el 79,9% de las emisiones de la industria minera derivadas del diésel provienen principalmente de las operaciones en minas a cielo abierto, las cuales utilizan el 99,9% del diésel. El hidrógeno verde será comprado a un distribuidor externo

que lo producirá mediante electrólisis, empleando electricidad generada al 100% a partir de energías renovables no convencionales (ERNC) como la solar o la eólica, sin generar emisiones durante su producción. Al usarse como combustible en camiones CAEX, reemplazando parcialmente al diésel en motores duales, se garantiza una disminución de las emisiones de CO₂.

Para dimensionar las emisiones, se tienen en consideración las características de un camión tipo CAEX con un tamaño del motor cuya potencia es 2700 HP.

Tabla 4.10: *Características camión de extracción minera*

CAEX	Diario	Anual
Consumo de diésel (litros)	4.122	1.504.530
Demanda energética (kWh)	42.457	15.496.659
Emisiones de CO ₂ eq (kg)	10.305	3.761.325

Fuente: Elaboración propia

Para poder calcular la cantidad de emisiones que se reducen gracias al diésel es necesario recordar que el factor de conversión del diésel tiene un valor de 2,5 (kg de CO₂ eq. / litro) y un poder calorífico de 10,3 (Kwh / litro). Para poder calcular las emisiones en el escenario alternativo se ocupa la **ecuación 4.7** que toma en cuenta la energía diésel que se deja de consumir equivalente a la demanda energética del hidrógeno.

$$\text{Emisión} \left(\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{consumo energético diésel} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) \cdot \text{FC} \left(\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{litro}} \right)}{\text{Poder calorífico} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{litro}} \right)} \quad (4.7)$$

4.4.1 *Estimación de las Emisiones Reducidas mediante el Uso de Hidrogeno Verde*

Es importante recordar que se está utilizando la base de datos de la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) para este análisis. A partir de esta fuente, se han obtenido las proyecciones de emisiones de CO₂ para la industria minera, lo que permite realizar estimaciones precisas sobre el impacto ambiental y la reducción de emisiones con la adopción de alternativas más limpias como el hidrógeno verde o el sistema trolley.

En la **Tabla 4.11** se presentan las emisiones para los años de análisis y en Anexos se encuentra la proyección completa de las emisiones para los años 2025 -2050 en el escenario actual.

Tabla 4.11: *Estimación de las emisiones de CO₂ de camiones CAEX*

Año	Emisiones CO ₂ eq (kton)	Demanda energética (TWh)
2025	6.063	24,98
2030	6.347	26,15
2040	7.682	31,65
2050	9.102	37,50

Fuente: Elaboración propia

La reducción en la generación de dióxido de carbono se determina con base a la cantidad de diésel que se deja de quemar al ser sustituido por el hidrógeno. La energía proporcionada por el hidrógeno representa el ahorro en emisiones de CO₂ eq., lo cual se puede calcular utilizando la ecuación 4.7 obteniendo lo siguiente.

Tabla 4.12: *Estimación de las emisiones de CO₂ de camiones CAEX*

Año	% Incorporación de hidrógeno	Energía aportada (TWh)	Ahorro emisiones CO ₂ eq (kton)
2025	0,34%	0,085	21
2030	7,65%	2,00	485
2040	22,26%	7,05	1.711
2050	36,87%	13,83	3.356

Fuente: Elaboración propia

En relación con el ahorro acumulado de emisiones de dióxido de carbono equivalente, se observa que para el año 2030 este ahorro alcanza los 1.485 kton, lo que implica una reducción del 4,05% en comparación con el escenario de referencia. Específicamente en el año 2030, se tiene un ahorro de 485 kton. Para el año 2040, el ahorro de emisiones acumulado se incrementa a 12.695 kton, representando una disminución del 11,86%. Finalmente, para el año 2050, el ahorro acumulado se eleva a 38.529 kton de CO₂ equivalente, con un ahorro anual de 3.356 kton, lo que resulta en una reducción del 20,10% en comparación con el escenario de referencia.

La implementación de la tecnología dual diésel-hidrógeno tiene un impacto significativo en la reducción de emisiones. Este impacto es más pronunciado en años posteriores en donde la adopción de esta tecnología y sus beneficios ambientales aumentan progresivamente. A continuación, en la **Figura 4.11** se muestra el comportamiento de las emisiones en ambos escenarios.

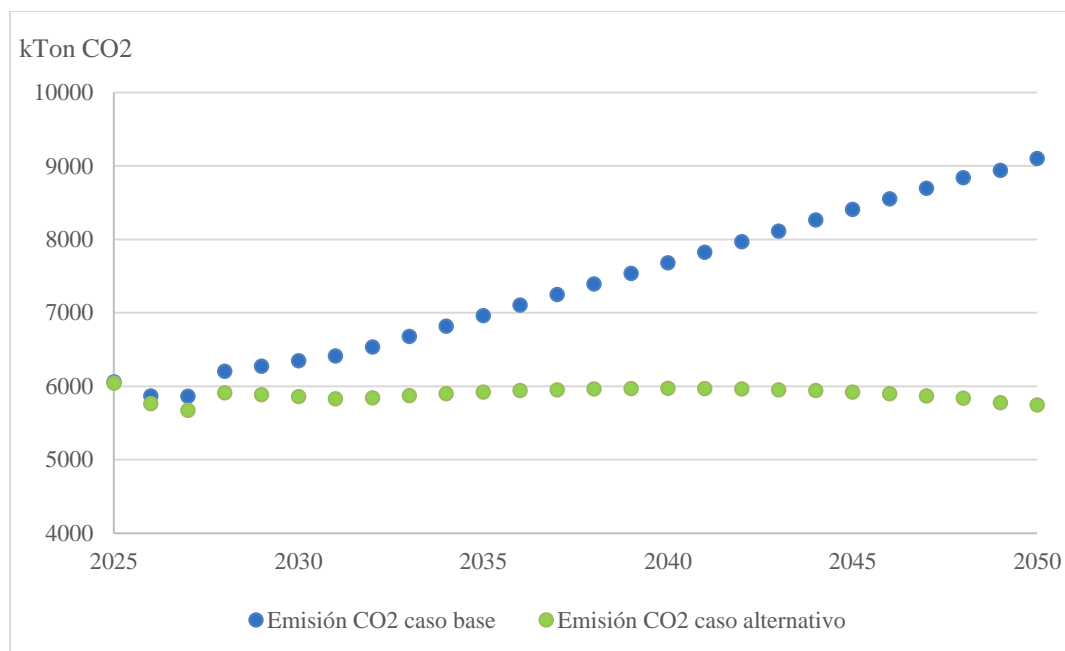


Figura 4.11 Comparación de las emisiones de CO₂ eq (kton) entre ambos escenarios

(Fuente: Elaboración Propia).

En el caso base, representada por la línea azul, las emisiones de CO₂ muestran una tendencia ascendente constante, indicando que las emisiones aumentan de manera continua a medida que avanza el tiempo. Este incremento se atribuye al incremento en el consumo de diésel y de camiones en la industria y a la falta de medidas significativas para mitigar las emisiones en este escenario.

Por otro lado, el caso alternativo, representado por la línea verde, muestra una tendencia casi horizontal, lo que implica que las emisiones de CO₂ se mantienen relativamente estables a lo largo del tiempo. Este comportamiento sugiere que la implementación de la tecnología dual (40% diésel y 60% hidrógeno) es efectiva en limitar el crecimiento de las emisiones, contribuyendo significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero.

El contraste entre las dos líneas destaca la efectividad del caso alternativo en la reducción

de emisiones. Mientras que en el escenario base las emisiones continúan aumentando, el escenario alternativo no solo evita este incremento, sino que también logra mantener las emisiones en niveles mucho más bajos. Este resultado es crucial para las metas de sostenibilidad y neutralidad de carbono de la industria minera.

En este contexto, se ha considerado la combinación de ambas tecnologías ya mencionadas, es decir, la implementación de motores duales (hidrógeno y diésel) y el sistema trolley. Este último se realiza bajo el supuesto que será implementado en todos los camiones de la industria minera para el año 2030. El sistema trolley permite la eliminación del diésel en las subidas de los trayectos de los camiones, lo que representa, en promedio, una reducción del 66,5% del consumo total de diésel en los recorridos diarios y, en consecuencia, este porcentaje se traduce en una reducción equivalente de las emisiones de CO₂.

La **Figura 4.12** presentada a continuación compara tres escenarios: las emisiones de CO₂ en el escenario actual, las emisiones de CO₂ en el escenario actual utilizando el sistema trolley, y las emisiones de CO₂ en el escenario alternativo combinando el motor dual con el sistema trolley. Este análisis busca evaluar el impacto combinado de ambas tecnologías y subrayar los beneficios adicionales que podrían obtenerse al implementarse conjuntamente.

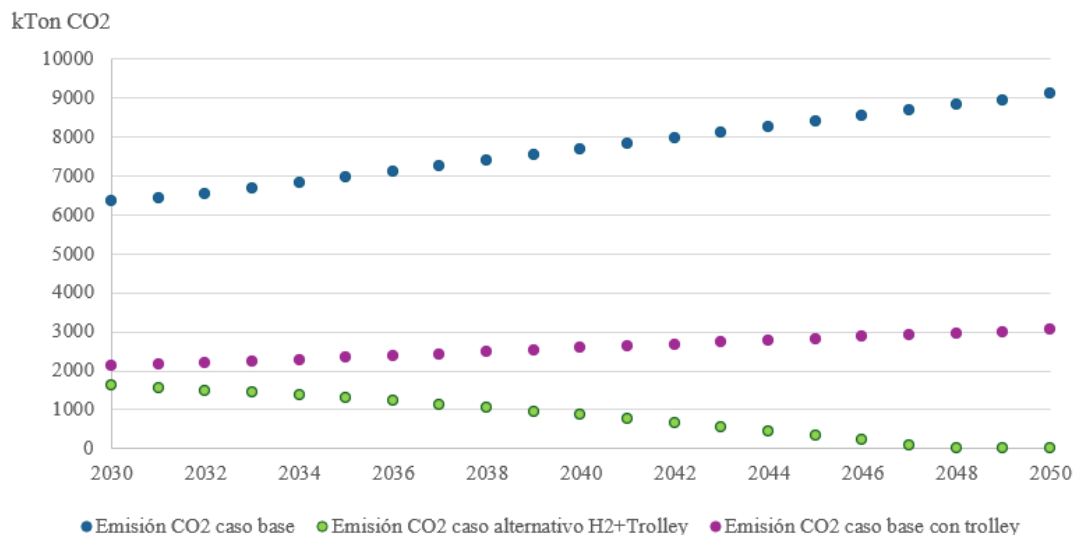


Figura 4.12 Comparación de las emisiones de CO₂ eq (kton): Escenario Actual vs Sistema Trolley vs Motor Dual + Sistema Trolley (Fuente: Elaboración Propia).

En 2030, el escenario base indica emisiones superiores a 7000 kton, reduciéndose a aproximadamente 2000 kton con el uso del sistema trolley. Sin embargo, al emplear tanto el motor dual como el sistema trolley, las emisiones descienden aún más, alcanzando alrededor de 1800 kton de dióxido de carbono. Es interesante observar que el sistema trolley mantiene las emisiones estables entre 2000 y 3000 kton desde 2030 hasta 2050, mientras que la combinación de ambas tecnologías conduce a una disminución gradual a lo largo de este periodo.

La integración simultánea del motor dual y el sistema trolley emerge como una estrategia altamente efectiva para mitigar las emisiones en la industria minera. Aunque cada tecnología individualmente ofrece beneficios notables, su sinergia alcanza niveles de reducción de emisiones considerablemente más bajos en comparación con el escenario base y el uso exclusivo del sistema trolley. Destaca el potencial combinado de ambas tecnologías, evidenciado por la posibilidad de alcanzar, para el año 2048, la cifra de 0 kton de emisiones, materializando así el ambicioso objetivo de sostenibilidad y neutralidad de carbono en la industria minera

4.5 Análisis de Costos Operativos

En el contexto actual de la industria minera, la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental se han convertido en factores críticos para determinar la viabilidad de diversas fuentes de energía. En particular, la transición del uso del diésel a hidrógeno verde y electricidad mediante sistemas trolley para camiones CAEX representa una de las estrategias más prometedoras. Este análisis comparativo evaluará los costos operativos asociados a estas tres fuentes de energía en los años 2025, 2030, 2040 y 2050, proporcionando una visión de su evolución y su impacto económico en termino de costos operativos.

4.5.1 *Evaluación de Costos Operativos Asociados al Uso de Diésel vs Hidrógeno Verde*

La evaluación de los costos operativos es fundamental para entender las implicaciones económicas de la adopción de nuevas tecnologías energéticas en la industria minera. Tradicionalmente, el diésel ha sido la fuente principal de energía para los camiones CAEX debido a su disponibilidad y alto contenido energético. Sin embargo, las preocupaciones ambientales y la volatilidad de los precios del petróleo han incentivado la búsqueda de alternativas más sostenibles y económicamente viables, como el hidrógeno verde y la electricidad.

La proyección de precios del diésel es un aspecto crucial a considerar debido a la alta incertidumbre que caracteriza su valor en el mercado global. Esta incertidumbre se debe principalmente a la dependencia de los mercados internacionales del petróleo, que están sujetos a fluctuaciones significativas por factores geopolíticos, decisiones de la OPEP, variaciones en la demanda global, y eventos naturales imprevistos. Además, el diésel es un recurso no renovable, lo que significa que su disponibilidad global está en constante disminución, contribuyendo a una tendencia al alza en sus precios de largo plazo.

Otro factor importante que influye en los precios del diésel es la política fiscal y ambiental de diversos países, que han implementado impuestos sobre los combustibles fósiles para desalentar su uso y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos impuestos incrementan el costo del diésel y reflejan una tendencia hacia precios más elevados en el futuro.

Según el informe anual de perspectivas energéticas 2021 de la Energy information administration (EIA), la agencia mantuvo una perspectiva conservadora para su pronóstico del precio del petróleo hasta el año 2050. Este informe proporciona una base sólida para analizar los precios futuros del diésel, ofreciendo datos críticos que permiten desarrollar estrategias económicas y ambientales más informadas.

A continuación, se presentan los datos de la proyección de precios del diésel según el informe de la EIA, esenciales para entender el comportamiento esperado de este recurso en los próximos años (Wong, 2022). Cabe destacar que los precios están originalmente en USD/bbl, pero se han convertido a USD/MWh. Esto se ha hecho considerando que un barril (bbl) equivale a 159 litros y usando la densidad energética del diésel (10,3 kWh/L), con el fin de facilitar la comparación con otros tipos de energía, como el hidrógeno verde y la electricidad.

En base a la proyección de precios de diésel, hidrógeno verde y electricidad para el sistema trolley, se podría determinar qué tipo de energía resulta más económica para su uso en camiones CAEX.

Tabla 4.13: *Proyección Costo del diésel*

Año	Costo Diésel (USD/BBL)	Costo Diésel (USD/MWh)
2025	61	37
2030	73	45
2040	87	53
2050	95	58

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del informe de EIA

La proyección de precios del hidrógeno verde presenta una baja incertidumbre en comparación con los combustibles fósiles, debido a que su costo está principalmente vinculado a los gastos de producción, en lugar de las fluctuaciones de los mercados internacionales. La tendencia general para el precio del hidrógeno verde es a la baja, impulsada por la continua maduración de las tecnologías de producción de hidrógeno y energía solar, que son las principales fuentes para generar hidrógeno verde. Esta maduración tecnológica conlleva a una mayor eficiencia y reducción de costos en la producción a lo largo del tiempo.

Además, la producción de hidrógeno verde no depende de recursos geopolíticos, lo que elimina una gran cantidad de incertidumbre relacionada con la oferta y la demanda globales de energía. A medida que más países invierten en infraestructuras para la producción y distribución de hidrógeno verde, se espera que los costos asociados continúen disminuyendo. Las políticas gubernamentales favorables y los incentivos financieros también juegan un papel crucial en la reducción de costos y la promoción del hidrógeno verde como una alternativa viable y sostenible a los combustibles fósiles.

Otro aspecto relevante por considerar es la independencia de los mercados internacionales. A diferencia del diésel, cuyos precios pueden ser afectados por decisiones políticas, conflictos internacionales y variaciones en la producción global de petróleo, el hidrógeno verde se produce

localmente utilizando recursos renovables, lo que proporciona estabilidad en los costos y asegura un suministro más predecible y controlable.

Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, se proyecta una disminución continua en los costos de producción del hidrógeno verde debido a los avances tecnológicos y la escala creciente de producción. La siguiente **Figura 4.13** muestra cómo se espera que los costos de producción de hidrógeno verde disminuyan significativamente hacia 2050, lo cual es crucial para evaluar la eficiencia y competitividad.

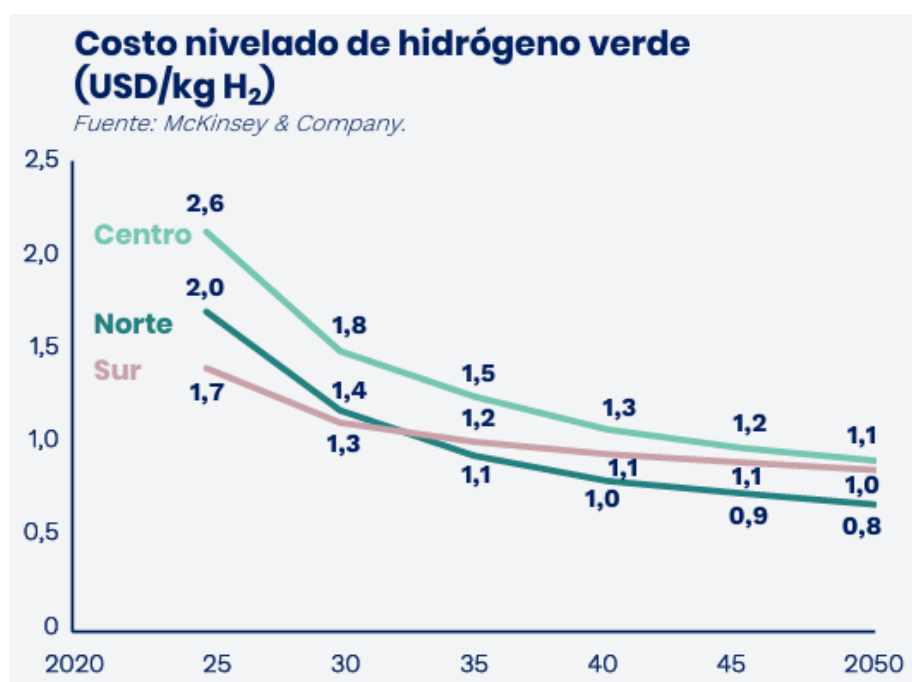


Figura 4.13 Proyección del costo nivelado de hidrógeno verde en USD / kgH₂ (Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020).

A continuación, se presentan los datos de la proyección de precios de producción de hidrógeno verde, los cuales son esenciales para comprender cómo esta fuente de energía evolucionará en términos de costo y viabilidad económica en los próximos años. Es importante

destacar que para este estudio se considerarán los costos proyectados específicamente para la zona norte del país. Al igual que con el diésel, los valores de costo están originalmente expresados en USD/kgH₂, pero para efectos de comparación y análisis, se transformarán a USD/MWh utilizando la densidad energética del hidrógeno, que es de 33,33 kWh/kg.

Tabla 4.14: *Proyección costo nivelado del hidrógeno verde*

Año	Costo H ₂ V(USD/kgH ₂)	Costo H ₂ V (USD/MWh)
2025	2	60
2030	1,4	42
2040	1	30
2050	0,8	24

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la estrategia nacional de hidrógeno verde

El norte de Chile es una región privilegiada para la generación de electricidad renovable debido a sus excepcionales condiciones naturales. Esta zona cuenta con la radiación solar más alta del planeta, lo que la convierte en un lugar ideal para la instalación de plantas de energía solar fotovoltaica. Además, los vientos constantes y fuertes en ciertas áreas del norte chileno favorecen la generación de energía eólica, añadiendo otra capa de potencial para la producción de energía renovable. Estos factores naturales, combinados con el avance tecnológico y la reducción de costos en las tecnologías de generación de energía renovable, hacen del norte de Chile un lugar estratégico para la inversión en estas fuentes de energía limpia.

Es fundamental tener en cuenta que la disponibilidad de estos recursos naturales no solo garantiza un suministro constante y predecible de energía, sino que también ayuda a reducir la dependencia de los mercados internacionales y la volatilidad de precios asociados con los combustibles fósiles. La capacidad de aprovechar al máximo estos recursos permite proyectar una

disminución significativa en los costos de producción de electricidad renovable en el futuro.

A continuación, se presentan los datos de la proyección de costos nivelados de electricidad renovable, extraídos de la estrategia nacional de hidrógeno verde. Estos datos son cruciales para entender cómo evolucionarán los costos de esta fuente de energía en términos de viabilidad económica en los próximos años. Para este análisis, se considerarán los costos proyectados específicamente para la zona norte del país, utilizando estos valores como referencia para la proyección de costos operativos en el sector minero.

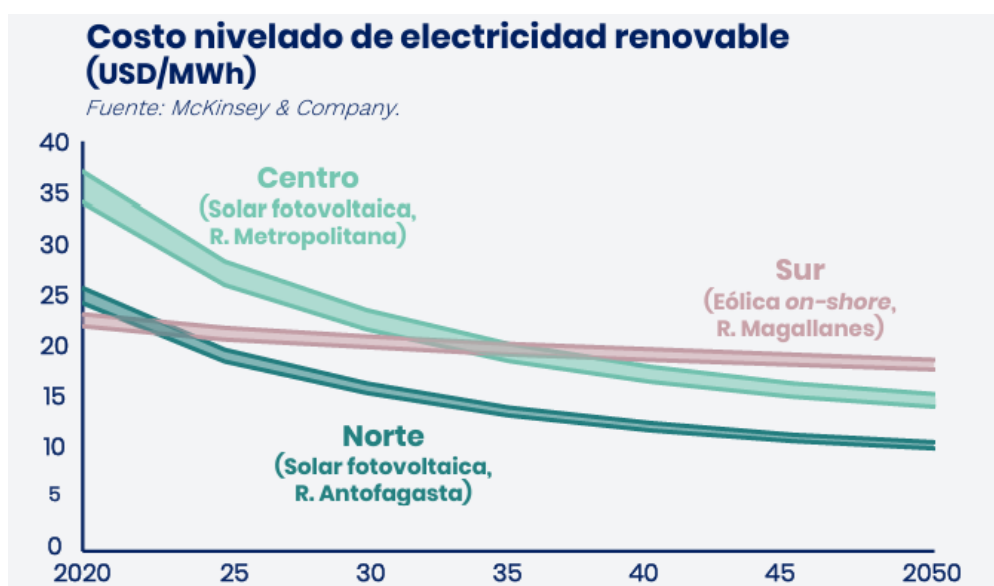


Figura 4.14 Proyección del costo nivelado de electricidad renovable en USD / MWh

(Fuente: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, 2020).

Los datos presentados en la **Tabla 4.15** brindan una representación más detallada de los costos nivelados de electricidad renovable mostrados en la **Figura 4.14**. Estos costos específicos para la zona norte de Chile serán fundamentales para comparar los distintos escenarios evaluados en este estudio.

Tabla 4.15: *Proyección costo nivelado de energía renovable*

Año	Costo Electricidad (USD/MWh)
2025	18
2030	16
2040	12
2050	10

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la estrategia nacional de hidrógeno verde.

Para una comprensión más detallada de las estimaciones de energía necesaria y su distribución para los distintos tipos de energía mencionados (diésel, hidrógeno verde y electricidad renovable) en los distintos escenarios, se pueden consultar los anexos. Estos anexos contienen datos que desglosan el consumo energético específico y las proyecciones futuras para cada tipo de energía en los diversos escenarios.

A continuación, se procede a un análisis comparativo de costos que abordará varios escenarios clave. En primer lugar, se evaluará el “*Costo Total de Operaciones con Diésel en el Escenario Base*”, el cual refleja la situación actual de la industria minera sin la implementación de nuevas tecnologías o energías alternativas. Este nos brinda una línea base para comparar los beneficios económicos y operativos de otras estrategias.

Tabla 4.16: *Costo de Operaciones con Diésel en el Escenario Base*

Año	Costo Diésel (USD)
2025	\$ 930.388.727
2030	\$ 1.165.522.775
2040	\$ 1.681.405.336
2050	\$ 2.175.258.616

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se analiza el “*Costo Total de Operación del Diésel y Electricidad Renovable en el Escenario Base utilizando el Sistema Trolley*”. Este escenario considera la implementación del sistema trolley, que utiliza electricidad renovable, en combinación con el uso de diésel y reduce en un 66,5% la cantidad de diésel consumido. Esto permitirá observar como la incorporación del trolley puede influir en los costos operativos, reduciendo la dependencia exclusiva del diésel y potencialmente disminuyendo las emisiones de CO₂.

Tabla 4.17: *Costo de Operación del Diésel y Electricidad Renovable en el Escenario Base utilizando el Sistema Trolley*

Año	Diésel (USD)	Electricidad (USD)	Total (USD)
2025	\$ 930.388.727	\$ 0	\$ 930.388.727
2030	\$ 390.450.130	\$ 278.210.733	\$ 668.660.863
2040	\$ 563.270.788	\$ 252.575.028	\$ 815.845.815
2050	\$ 728.711.636	\$ 249.369.473	\$ 978.081.109

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se evaluará el “*Costo Total de Operación del Diésel, el Hidrógeno Verde y la Electricidad Renovable en el Escenario Alternativo*”. En este escenario, se analiza el uso combinado de hidrógeno verde y el sistema trolley, evaluando como la integración de ambos tipos de energía pueden optimizar los costos operativos y contribuir a una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Este escenario pretende mostrar una solución más sostenible y económica a largo plazo, alineada con los objetivos de reducción de emisiones y mejora de la eficiencia energética en la industria minera.

Tabla 4.18: *Costo de Operación del Diésel, Electricidad Renovable, hidrógeno verde en el escenario alternativo*

Año	Diésel (USD)	Electricidad (USD)	H2V (USD)	Total (USD)
2025	\$ 927.206.219	\$ 0	\$ 5.127.064	\$ 932.333.283
2030	\$ 301.314.343	\$ 278.210.733	\$ 83.995.556	\$ 663.520.633
2040	\$ 189.006.746	\$ 252.575.028	\$ 211.377.076	\$652.958.850
2050	\$ 0	\$ 249.369.473	\$ 301.523.469	\$ 550.892.942

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de proporcionar una visión completa y clara de los costos operativos asociados a cada escenario estudiado, se ha elaborado una tabla comparativa que resumen los costos totales de los 3 escenarios planteados en los años de estudio 2025, 2030, 2040 y 2050. Esta tabla permite visualizar de manera sencilla cómo varían los costos en cada escenario y facilita el análisis comparativo entre el uso exclusivo de diésel, la combinación de diésel y electricidad renovable mediante el sistema trolley, y la adopción del hidrógeno verde en conjunto con el sistema trolley.

Tabla 4.19: *Resumen de costos operacionales totales de energía para cada escenario*

Año	Escenario Base (USD)	Escenario base con trolley (USD)	Escenario alternativo H2+Trolley (USD)
2025	930.388.727	930.388.727	932.333.283
2030	1.165.522.775	668.660.863	663.520.633
2040	1.681.405.336	815.845.815	652.958.850
2050	2.175.258.616	978.081.109	550.892.942

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los datos presentados en la tabla comparativa de los costos operativos de los diferentes escenarios, se evidencia que en el año 2025 el escenario base, que utiliza únicamente

diésel, es el más rentable en términos de costos operativos. Sin embargo, esta tendencia cambia a medida que se proyectan los costos hacia el largo plazo. En los años 2030, 2040 y 2050, el escenario alternativo que combina hidrógeno verde con sistema trolley (H2+Trolley) demuestra ser considerablemente más rentable a largo plazo. Esta rentabilidad se debe a la disminución progresiva de los costos del hidrógeno verde y la electricidad renovable, mientras que los costos del diésel siguen una tendencia al alza debido a la escasez del recurso y las políticas fiscales.

Es importante mencionar que este estudio no incluye la cuantificación de la inversión inicial necesaria para implementar las nuevas tecnologías. La obtención de datos precisos sobre esta inversión es compleja debido a la limitada información disponible. No obstante, si en el futuro la implementación de camiones con tecnología dual (diésel e hidrógeno) resulta inviable o económicamente desfavorable debido a los altos costos de inversión, el escenario base con el sistema trolley emerge como una alternativa altamente rentable a largo plazo. Este enfoque no solo reducirá significativamente las emisiones de CO₂, sino que también permitiría mantener los costos operativos de manera más estable y predecible en comparación con el uso exclusivo de diésel.

Analizando los ahorros generados año tras año por el uso de estas distintas tecnologías, se presenta lo siguiente.

Tabla 4.20: Ahorros operacionales usando el sistema trolley y el sistema trolley+H2

Año	Trolley (USD)	Trolley + H2 (USD)
2025	0	-1.944.556
2030	496.861.912	502.002.142
2040	865.559.521	1.028.446.486
2050	1.197.177.507	1.624.365.674

Fuente: Elaboración propia

Para el año 2030, se empiezan a ver ahorros significativos, el uso del sistema trolley genera un ahorro de 496.861.912 USD, mientras que la combinación del trolley con hidrógeno verde alcanza un ahorro ligeramente mayor de USD 502.002.142 USD. Este incremento en el ahorro refleja la disminución de los costos de producción del hidrógeno verde y la mayor eficiencia energética. La economía de escala y el avance tecnológico contribuyen a la reducción de los costos, haciendo que la tecnología sea más accesible y rentable.

En el año 2040, los ahorros continúan incrementándose, la diferencia de ahorros se amplía, demostrando la creciente rentabilidad del uso del hidrógeno verde a medida que la tecnología madura, y los costos de producción disminuyen. Este año marca un punto crítico donde la adopción de hidrógeno verde no solo se vuelve económica sino también estratégica para la sostenibilidad operativa.

Finalmente, para el año 2050 los ahorros se vuelven aún más significativos, la tendencia positiva subraya el potencial a largo plazo del hidrógeno verde como una fuente de energía más económica y sostenible. La reducción progresiva en los costos de producción del hidrógeno verde, junto con la eficiencia del sistema trolley, ofrece una solución económica y ecológica para la industria minera chilena.

4.6 Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo principal analizar el potencial uso del hidrógeno verde como fuente de energía para camiones CAEX en la industria minera chilena, evaluando el costo operativo y su impacto ambiental. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo de los aspectos técnicos, económicos y ambientales, comparando escenarios de uso de diésel y de hidrógeno verde. Además, el estudio incluyó el sistema trolley, actualmente en implementación en la industria minera, ofreciendo una perspectiva adicional para alcanzar los objetivos de las mineras en la misión de reducir las emisiones generadas en sus procesos.

Una de las conclusiones más destacadas, presentada en el apartado 4.4 y observada en la **Figura 4.12**, es que la integración simultánea del motor dual y el sistema trolley emerge como una estrategia altamente efectiva para mitigar las emisiones en la industria minera. Aunque cada tecnología individualmente ofrece beneficios notables, su combinación logra niveles de reducción de emisiones significativamente bajos en comparación con el escenario base, en el cual solo se utiliza combustible diésel. No obstante, es importante destacar que, incluso si no fuera posible implementar los camiones con motor dual para aprovechar el hidrógeno verde a corto plazo, el uso exclusivo del sistema trolley ya reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

La implementación del sistema motor dual y trolley no solo reduce las emisiones, sino que también promueve un uso más eficiente y sostenible de los recursos energéticos. Esta transición es esencial para cumplir con las metas globales de descarbonización y mitigación del cambio climático, evidenciando la posibilidad de alcanzar, para el año 2048, la cifra de 0 kton de CO₂ eq, materializando así el ambicioso objetivo de neutralidad de carbono en la industria minera chilena.

El análisis comparativo de costos operativos en diferentes escenarios revela que, aunque el escenario base resulta más rentable en el año 2025, los costos operativos tienden a incrementarse significativamente a largo plazo. En contraste, el escenario alternativo que combina el uso de hidrógeno verde y el sistema trolley demuestra ser más económico en los años 2030, 2040 y 2050. Esto se debe a la disminución progresiva en los costos de producción de hidrógeno verde y al uso eficiente de la energía renovable.

En caso de que la implementación del motor dual hidrógeno verde-diésel no sea rentable en el corto-mediano plazo, pero sí en el largo plazo, el uso del sistema trolley se presenta como una solución viable. No solo reduce significativamente las emisiones de CO₂, sino que también mantiene los costos operativos de manera controlada y considerablemente más bajos en comparación con el uso exclusivo de diésel.

La viabilidad económica del uso de hidrógeno verde está sujeta a diversas variables, incluyendo el costo de producción de hidrógeno, la disponibilidad de infraestructura y las políticas regulatorias. Aunque los costos iniciales de inversión para implementar estas tecnologías son elevados y no fueron cuantificados en este estudio debido a la dificultad de obtener datos precisos, se sugiere que, una vez superados estos obstáculos, la tecnología dual presenta una opción muy rentable a largo plazo. Esto se debe a la estabilidad en los costos operativos y a la disminución en la dependencia de combustibles fósiles. Además, si los costos de inversión, una vez cuantificados, no superan los ahorros logrados con los costos operativos, entonces el uso del hidrógeno más el sistema trolley es una opción viable en todos los sentidos económicos y ambientales.

La adopción de tecnologías de hidrógeno verde en la industria minera podría posicionar a Chile como un líder en innovación energética. La alta radiación solar y los vientos favorables en

el norte de Chile crean un entorno ideal para la generación de energía renovable, lo cual es crucial para la producción de hidrógeno verde. Esta ventaja geográfica puede ser explotada para mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector minero chileno.

Este estudio ha demostrado que la integración del hidrógeno verde y el sistema trolley ofrece una estrategia robusta y efectiva para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria minera chilena. La combinación de estas tecnologías no solo promueve una transición hacia un uso más sostenible de los recursos energéticos, sino que también posiciona a las empresas mineras en línea con los objetivos globales de descarbonización. A pesar de los desafíos iniciales de inversión, la viabilidad económica a largo plazo se muestra prometedora, destacando la importancia de políticas regulatorias favorables y avances tecnológicos continuos para alcanzar una neutralidad de carbono para el año 2048.

4.6.1 Recomendaciones

Para la implementación exitosa de tecnologías de hidrógeno verde en la industria minera, es fundamental considerar aspectos técnicos, económicos y regulatorios. Se deben desarrollar políticas públicas que fomenten la inversión en infraestructura y tecnología necesarias para el hidrógeno verde, incluyendo incentivos fiscales, subsidios y financiación para proyectos relacionados con la producción y uso de hidrógeno. La colaboración entre los sectores público y privado es crucial para acelerar el desarrollo y adopción de estas tecnologías. Asimismo, la capacitación y desarrollo de habilidades en el manejo de nuevas tecnologías son esenciales para asegurar una transición efectiva. Es recomendable establecer programas de formación para el personal de la industria minera, enfocados en el manejo seguro y eficiente del hidrógeno y sus aplicaciones. Esto no solo mejorará la seguridad y eficiencia operativa, sino que también facilitará

la aceptación y uso generalizado del hidrógeno verde en la minería.

Este estudio establece una base sólida para futuras investigaciones, pero también destaca la necesidad de un análisis más detallado sobre los costos de inversión inicial y la infraestructura requerida. Se sugiere realizar estudios adicionales que profundicen en las implicaciones económicas y ambientales a largo plazo, considerando diversos escenarios de mercado y políticas energéticas.

Al calcular y proyectar la demanda de energía requerida en Mina Rajo Abierto, es importante destacar que todos los datos se obtuvieron de fuentes confiables como el Ministerio de Energía, lo cual las convierte en las más fiables para realizar estas proyecciones. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que estas proyecciones son susceptibles a cambios o variaciones debido a la posible implementación de otras tecnologías que actualmente no están consideradas en las mineras ni en este estudio.

El hidrógeno se presenta como una ventaja notable en términos de eficiencia energética debido a su alto poder calorífico, con 33,33 kWh/kg H₂. Este valor es más de tres veces el poder calorífico del diésel, lo cual lo posiciona como una opción viable y eficiente para futuras aplicaciones energéticas en la industria minera. Dado lo anterior, es crucial promover e impulsar propuestas de proyectos piloto y otras tecnologías que faciliten la incorporación del hidrógeno verde en la industria minera. Esto incluye desde la producción de hidrógeno a partir de energías renovables hasta la adaptación de motores CAEX. Actualmente, las empresas constructoras de camiones CAEX están en fases de estudio para conseguir un camión rentable que pueda operar con motores duales. Sin embargo, aún se desconocen los requerimientos y limitantes para llevar a cabo el desarrollo de sistemas de combustión dual.

Por lo tanto, es necesario fomentar la implementación de programas de investigación que evalúen la viabilidad de usar hidrógeno como combustible en camiones mineros. Estos programas deben abordar tanto los aspectos técnicos como económicos y regulatorios, asegurando que se realicen avances significativos en la adaptación de la tecnología de hidrógeno verde a las necesidades específicas de la industria minera. Además, si los costos de inversión, una vez cuantificados, no superan los ahorros logrados con los costos operativos, entonces el uso del hidrógeno más el sistema trolley es una opción viable en todos los sentidos económicos y ambientales.

Finalmente, es fundamental trabajar en una normativa que regule y reconozca el uso de hidrógeno como combustible, garantizando la seguridad en los procesos de producción y uso. Se propone estudiar las acciones regulatorias de los países en donde el mercado está en desarrollo e identificar las brechas de Chile en comparación con la normativa internacional. Para implementar de manera correcta el uso de hidrógeno en las mineras, se deben crear normas, guías de buenas prácticas y protocolos de seguridad que sigan con los lineamientos de las operaciones mineras.

5 Anexos

Tabla 5.1: Proyección emisiones de CO₂ eq, consumo de diésel, camiones CAEX y demanda energética

Año	Emisiones CO ₂ eq (kton)	Consumo Diésel (millones de litros)	Camiones CAEX	Demanda energética (TWh)
2020	5.233	2.093	1.391	21,56
2021	5.326	2.130	1.416	21,94
2022	5.734	2.293	1.524	23,62
2023	5.945	2.378	1.581	24,49
2024	6.303	2.521	1.676	25,97
2025	6.063	2.425	1.612	24,98
2026	5.871	2.348	1.561	24,19
2027	5.864	2.345	1.559	24,16
2028	6.205	2.482	1.650	25,56
2029	6.275	2.510	1.668	25,85
2030	6.347	2.539	1.687	26,15
2031	6.414	2.566	1.705	26,43
2032	6.535	2.614	1.737	26,92
2033	6.678	2.671	1.775	27,51
2034	6.821	2.728	1.813	28,10
2035	6.964	2.786	1.852	28,69
2036	7.108	2.843	1.890	29,28
2037	7.250	2.900	1.927	29,87
2038	7.393	2.957	1.966	30,46
2039	7.538	3.015	2.004	31,06
2040	7.682	3.073	2.042	31,65
2041	7.827	3.131	2.081	32,25
2042	7.970	3.188	2.119	32,84
2043	8.113	3.245	2.157	33,43
2044	8.265	3.306	2.197	34,05
2045	8.408	3.363	2.235	34,64
2046	8.552	3.421	2.274	35,23
2047	8.695	3.478	2.312	35,82
2048	8.839	3.535	2.350	36,42
2049	8.942	3.577	2.377	36,84
2050	9.102	3.641	2.420	37,50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2: *Proyección de la demanda de hidrógeno para cubrir la demanda energética según la tasa de participación para el periodo 2025-2050.*

Año	Participación hidrógeno	Energía aportada (TWh)	Demanda hidrógeno (ton)	Cantidad de camiones posibles de abastecer
2025	0,34%	0,085	2.564	9
2026	1,80%	0,436	13.086	47
2027	3,26%	0,789	23.660	85
2028	4,73%	1,208	36.243	130
2029	6,19%	1,599	47.986	172
2030	7,65%	2,000	59.997	215
2031	9,11%	2,407	72.222	259
2032	10,57%	2,846	85.380	306
2033	12,03%	3,310	99.316	356
2034	13,49%	3,792	113.756	408
2035	14,95%	4,290	128.727	461
2036	16,41%	4,807	144.216	517
2037	17,88%	5,339	160.189	574
2038	19,34%	5,890	176.711	633
2039	20,80%	6,459	193.793	695
2040	22,26%	7,045	211.377	758
2041	23,72%	7,649	229.505	823
2042	25,18%	8,269	248.083	889
2043	26,64%	8,906	267.203	958
2044	28,10%	9,570	287.118	1.029
2045	29,56%	10,242	307.288	1.102
2046	31,03%	10,931	327.976	1.176
2047	32,49%	11,638	349.183	1.252
2048	33,95%	12,362	370.908	1.330
2049	35,41%	13,046	391.407	1.403
2050	36,87%	13,826	414.823	1.487

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3: *Proyección de emisiones de CO₂ eq y el ahorro en el escenario alternativo para el periodo 2025-2050.*

Año	Escenario actual		Escenario alternativo		Ahorro	
	Emisiones CO ₂ eq (kton)	Emisiones Acumuladas (kton)	Emisión CO ₂ eq (kton)	Emisiones Acumuladas (kton)	Ahorro de CO ₂ eq (kton)	Ahorro acumulado (kton)
2025	6.063	6.063	6.042	6.042	21	21
2026	5.871	11.933	5.765	11.807	106	127
2027	5.864	17.797	5.672	17.479	191	318
2028	6.205	24.002	5.911	23.390	293	611
2029	6.275	30.276	5.887	29.277	388	999
2030	6.347	36.623	5.861	35.138	485	1485
2031	6.414	43.037	5.830	40.968	584	2069
2032	6.535	49.572	5.844	46.812	691	2760
2033	6.678	56.250	5.875	52.687	803	3563
2034	6.821	63.071	5.900	58.587	920	4483
2035	6.964	70.035	5.923	64.510	1.041	5525
2036	7.108	77.142	5.941	70.451	1.167	6692
2037	7.250	84.392	5.954	76.405	1.296	7987
2038	7.393	91.785	5.963	82.368	1.430	9417
2039	7.538	99.323	5.970	88.338	1.568	10985
2040	7.682	107.005	5.972	94.311	1.710	12695
2041	7.827	114.833	5.971	100.281	1.857	14551
2042	7.970	122.803	5.963	106.244	2.007	16558
2043	8.113	130.916	5.952	112.196	2.162	18720
2044	8.265	139.181	5.942	118.138	2.323	21043
2045	8.408	147.589	5.922	124.061	2.486	23529
2046	8.552	156.141	5.899	129.959	2.653	26182
2047	8.695	164.836	5.870	135.830	2.825	29007
2048	8.839	173.675	5.838	141.668	3.001	32007
2049	8.942	182.617	5.776	147.444	3.166	35174
2050	9.102	191.719	5.746	153.190	3.356	38529

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4: *Proyección de emisiones las emisiones de CO2 eq (kton): Escenario Actual vs Sistema Trolley vs Motor Dual + Sistema Trolley.*

Año	Emisión CO2 eq caso base (kton)	Emisión CO2 eq caso base con trolley (kton)	Emisión CO2 eq caso alternativo H2+Trolley (kton)
2030	6.347	2.126	1.641
2031	6.414	2.149	1.565
2032	6.535	2.189	1.498
2033	6.678	2.237	1.434
2034	6.821	2.285	1.365
2035	6.964	2.333	1.292
2036	7.108	2.381	1.214
2037	7.250	2.429	1.133
2038	7.393	2.477	1.047
2039	7.538	2.525	957
2040	7.682	2.574	864
2041	7.827	2.622	766
2042	7.970	2.670	663
2043	8.113	2.718	556
2044	8.265	2.769	446
2045	8.408	2.817	331
2046	8.552	2.865	212
2047	8.695	2.913	88
2048	8.839	2.961	0
2049	8.942	2.996	0
2050	9.102	3.049	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.5: *Proyección de la distribución de aportes de energía para el escenario base utilizando el sistema trolley.*

Año	Energía Total Necesaria (MWh)	Energía diésel (MWh)	Energía hidrógeno (MWh)	Energía eléctrica (MWh)
2025	24.978.649	24.893.207	85.443	0
2026	24.187.292	23.751.149	436.143	0
2027	24.157.739	23.369.153	788.586	0
2028	25.563.137	24.355.164	1.207.973	0
2029	25.852.098	24.252.737	1.599.361	0
2030	26.147.625	6.759.760	1.999.694	17.388.171
2031	26.426.735	6.445.788	2.407.168	17.573.779
2032	26.922.564	6.173.353	2.845.706	17.903.505
2033	27.513.620	5.906.872	3.310.190	18.296.557
2034	28.101.391	5.622.463	3.791.503	18.687.425
2035	28.692.446	5.321.486	4.290.483	19.080.477
2036	29.283.502	5.003.237	4.806.736	19.473.529
2037	29.867.989	4.666.690	5.339.086	19.862.213
2038	30.459.045	4.313.993	5.889.787	20.255.265
2039	31.056.667	3.944.858	6.459.126	20.652.684
2040	31.651.006	3.557.889	7.045.198	21.047.919
2041	32.248.628	3.153.874	7.649.417	21.445.338
2042	32.836.400	2.731.575	8.268.619	21.836.206
2043	33.427.455	2.292.325	8.905.873	22.229.258
2044	34.051.347	1.837.575	9.569.627	22.644.146
2045	34.642.402	1.363.300	10.241.904	23.037.197
2046	35.233.457	871.754	10.931.454	23.430.249
2047	35.824.512	362.936	11.638.276	23.823.301
2048	36.415.568	0	12.199.215	24.216.352
2049	36.842.441	0	12.342.218	24.500.223
2050	37.499.169	0	12.562.222	24.936.947

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.5: *Proyección de la distribución de aportes de energía para el escenario alternativo de H2 en conjunto con el sistema trolley*

Año	Energía diésel (MWh)	Energía Eléctrica (MWh)
2025	24.978.649	0
2026	24.187.292	0
2027	24.157.739	0
2028	25.563.137	0
2029	25.852.098	0
2030	8.759.454	17.388.171
2031	8.852.956	17.573.779
2032	9.019.059	17.903.505
2033	9.217.063	18.296.557
2034	9.413.966	18.687.425
2035	9.611.970	19.080.477
2036	9.809.973	19.473.529
2037	10.005.776	19.862.213
2038	10.203.780	20.255.265
2039	10.403.983	20.652.684
2040	10.603.087	21.047.919
2041	10.803.291	21.445.338
2042	11.000.194	21.836.206
2043	11.198.197	22.229.258
2044	11.407.201	22.644.146
2045	11.605.205	23.037.197
2046	11.803.208	23.430.249
2047	12.001.212	23.823.301
2048	12.199.215	24.216.352
2049	12.342.218	24.500.223
2050	12.562.222	24.936.947

Fuente: Elaboración propia

6 Referencias

Ah2V Biobío | Hidrógeno verde. (s.f.). <https://www.ah2vbiobio.cl/hidrogeno-verde/>

Ministerio de Energía. (noviembre de 2022). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.

<https://onx.la/47df0>

Alianza por la Salud Alimentaria. (2023). El casquete polar de la Antártida se reduce a niveles

récords. *Alianza Por La Salud Alimentaria*. [https://alianzasalud.org.mx/2023/03/el-](https://alianzasalud.org.mx/2023/03/el-casquete-polar-de-la-antartida-se-reduce-a-niveles-records/)

[casquete-polar-de-la-antartida-se-reduce-a-niveles-records/](https://alianzasalud.org.mx/2023/03/el-casquete-polar-de-la-antartida-se-reduce-a-niveles-records/)

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (13 de junio de 2022). *Biblioteca del Congreso*

Nacional. www.bcn.cl/leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (4 de abril de 2023). *Impactos socioeconómicos de la minera en Chile*. Recuperado el 02 de noviembre de 2023.

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf

Cabello, P. M. (28 de enero de 2022). Codelco se suma a Alianza Komatsu GHG para contar con CAEX cero emisiones - Reporte Minero | El portal de minería en Chile. Reporte Minero | El Portal De Minería En Chile.

<https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2022/01/codelco-komatsu-ghg-caex-cero-emisiones>

Centro Cambio Global UC. (s.f.). *Glosario - Emisión de dióxido de carbono-equivalente*.

<https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/emision-de-dioxido-de-carbono-equivalente>

Comisión Chilena del Cobre. (2022). *Descarbonización e Hidrógeno Verde en la minería*

chilena: estado del arte y principales desafíos. Recuperado 5 de septiembre de 2023, de

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Estudio%20de%20Hidrogeno%20y%20Descarbonizacion%20Sector%20Minero%202022%20vF.pdf>

Comisión Chilena del Cobre (2022). *Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual*. Recuperado el 06 de noviembre de 2023.

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe%20GEI%20Directos%20e%20Indirectos%202021%20Final%20con%20rpi.pdf>

Comisión Nacional de Energía. (2022). *Anuario Estadístico de Energía*.

<https://www.cne.cl/nuestros-servicios/reportes/informacion-y-estadisticas/>

Cwienk, J. (6 de agosto de 2023). La superficie del mar registra sus más altas temperaturas.

dw.com. <https://www.dw.com/es/la-superficie-del-mar-registra-sus-m%C3%A1s-altas-temperaturas/a-66453862>

De Aragón, E. (26 de marzo de 2024). Global Data señala a la tecnología como impulsor del H2 verde. Hidrogeno Verde. <https://hidrogeno-verde.es/avances-tecnologicos-e-hidrogeno-verde-global-data/>

Dönicke, D. B. (2017, August 31). Cálculo del consumo de combustible y emisiones De co2 de camiones mineros, mediante simulación Discreta.

<https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/3316>

Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía (marzo de 2024). Reporte Mensual ERNC.

https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/03/RMensual_ERNC_v202403.pdf

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Quéré, C. L., Van Der Laan-Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R.,

- Alkama, R., . . . Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Fundación Aequae. (20 de octubre de 2021). *Efecto invernadero y cambio climático - Fundación Aequae*. <https://www.fundacionaequae.org/wiki/efecto-invernadero-y-cambio-climatico/>
- García, G. (15 de diciembre de 2023). Este gigantesco camión minero eléctrico se pasa al hidrógeno y se despide del diésel. Híbridos Y Eléctricos. https://www.hibridosyelectricos.com/camiones/este-gigantesco-camion-minero-electrico-se-pasa-hidrogeno-se-despide-diesel_72105_102.html
- GRN. (22 de febrero de 2017). *Impacto ambiental de la Minería en Chile | GRN*. <https://www.grn.cl/impacto-ambiental/impacto-ambiental-de-la-mineria-en-chile.html>
- Gutiérrez, R. G. (2022). Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile. *Dirección Meteorológica de Chile, 2022*. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/05/reporteEvolucionClima2022.pdf>
- Hidrógeno verde*. (s.f.). Generadoras De Chile. <https://generadoras.cl/tipos-energia/hidrogeno-verde>
- H2Chile (2022) *Primer camión minero a hidrógeno verde es presentado en Sudáfrica por AngloAmerican*. <https://h2chile.cl/primer-camion-minero-a-hidrogeno-verde-es-presentado-en-sudafrica-por-angloamerican/>
- ICEX España Exportación e Inversiones. (29 de noviembre de 2022). El hidrógeno verde en el Banco Mundial y en el Banco Interamericano de Desarrollo. <https://lc.cx/pllsks>
- IEA, 2019. The Future of Hydrogen. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- Implementa Sur | Comisión Solar e Innovación Energética (s.f). Estudio para definir esquemas de financiamiento para acelerar la adopción tecnológica e implementación de proyectos de

generación, almacenamiento, transporte, consumo y exportación de Hidrógeno Verde en Chile. <https://lc.cx/wO4hnN>

Jurídica, E. A. (3 de mayo de 2022). *Proponen que industria minera recambie todos los vehículos a cero emisiones hacia el 2030*. DOE | Actualidad Jurídica.

<https://actualidadjuridica.doe.cl/proponen-que-industria-minera-recambie-todos-los-vehiculos-a-cero-emisiones-hacia-el-2030/>

Meneses, E. (31 de enero de 2022). Codelco se suma a Alianza Komatsu GHG para contar con CAEX cero emisiones. Rumbo Minero. <https://www.rumbominero.com/chile/codelco-se-suma-a-alianza-komatsu-ghg-cero-emisiones/>

Minera Los Pelambres | Antofagasta Minerals (Mayo de 2022). Sistemas Trolley.

<https://4echile.cl/wp-content/uploads/2022/05/GIZ-Trolley-MLP-vP.pdf>

Ministerio de Energía (16 de noviembre de 2021). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026. https://energia.gob.cl/sites/default/files/eficiencia-energetica_16-nov.pdf

Ministerio de Energía (2022). *Informe Balance Nacional de Energía 2020*. Recuperado el 03 de noviembre de 2023.

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/2022_informe_anual_bne_2020.pdf

Ministerio de Energía (s.f.a). *PLAN NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2022-2026* / *Ministerio de Energía*. <https://energia.gob.cl/consultas-publicas/plan-nacional-de-eficiencia-energetica-2022-2026>

Ministerio de Energía (s.f.b). *Plan de Descarbonización proceso histórico para Chile* /

Ministerio de Energía. (n.d.). <https://energia.gob.cl/noticias/aysen-del-general-carlos-ibanez-del-campo/plan-de-descarbonizacion-proceso-historico-para-chile>

Ministerio de Energía. (marzo de 2022). Hidrogeno Verde un Proyecto País.

https://energia.gob.cl/sites/default/files/guia_hidrogeno_abril.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (2020a) *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero – Cambio Climático*. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones/>

Ministerio del Medio Ambiente (2020b) *Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile*.

<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/ReporteClimatico2020-edmay2021.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente (2022). *5to Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Recuperado el 31 de octubre de 2023. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2022/12/Informe_5IBA_2022.pdf

Ministerio del Medio Ambiente (s.f.) *¿Qué es el Cambio Climático? – Cambio Climático*.

<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/que-es-el-cambio-climatico/>

m3tTeasYK, A. (s.f.). *Komatsu 930E-4 Descripción de Componentes Principales*. Scribd.

<https://es.scribd.com/document/383426504/Komatsu-930E-4-Descripcion-de-Componentes-Principales>

Naciones Unidas (11 de diciembre de 2020). *Neutralidad en carbono para 2050: la misión mundial más urgente* | secretario general de las Naciones Unidas.

<https://www.un.org/sg/es/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission>

Naciones Unidas. (17 de mayo de 2023). *Noticias ONU. Los próximos cinco años serán los más cálidos jamás registrados*. <https://news.un.org/es/story/2023/05/1521047>

Naciones Unidas. (s.f.a). *Cambio climático / Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

Naciones Unidas. (s.f.b). *Causas y efectos del cambio climático / Naciones Unidas*.
<https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

Naciones Unidas. (s.f.c). *¿Qué es el cambio climático? / Naciones Unidas*.
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

Naciones Unidas. (s.f.d). *El Acuerdo de París / Naciones Unidas*.
<https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

Observatorio Del Principio 10 (s.f). *Ley Marco de Cambio Climático (Ley No. 21.455) / Observatorio del Principio 10*. <https://observatoriop10.cepal.org/es/instrumento/ley-marco-cambio-climatico-ley-no-21455>

Parlamento Europeo (12 de abril de 2023). *¿Qué es la neutralidad de carbono y cómo alcanzarla para 2050? / Noticias / Parlamento Europeo*.
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190926STO62270/que-es-la-neutralidad-de-carbono-y-como-alcanzarla-para-2050>

Roa, M. M. (9 de noviembre de 2022). Diez países causan casi el 70% de las emisiones mundiales de CO₂. *Statista Daily Data*. <https://es.statista.com/grafico/28687/paises-con-el-mayor-porcentaje-de-emisiones-mundiales-de-co%25E2%2582%2582/>

Stefanelli, E. J. (19 de enero de 2017). El hidrógeno como combustible | Prof. Eduardo J. Stefanelli. Prof. Eduardo J. Stefanelli. <https://www.stefanelli.eng.br/es/hidrogeno/>

Uai, C. (s.f.). *Científicos detectan que la leña es el principal contaminante de Santiago*.
<https://centra.uai.cl/cientificos-detectan-que-la-lena-es-el-principal-contaminante-de-santiago/>

Universidad de Chile. (s.f.). *Chile lidera la crisis hídrica en América Latina - Universidad de Chile*. <https://uchile.cl/noticias/184816/dia-mundial-del-agua-chile-lidera-la-crisis-hidrica-en-america-latina>

Welle, D. (11 de noviembre de 2022). Emisiones de CO₂ de origen fósil batirán récords en 2022. *dw.com*. <https://www.dw.com/es/emisiones-de-co2-de-origen-f%C3%B3sil-batir%C3%A1n-r%C3%A9cords-en-2022/a-63720653>

Wong, Y. (31 de marzo de 2022). Oil price forecast 2025-2050: Price could fall below \$100/bbl. *Capital Com SV Investments Limited*. <https://capital.com/oil-price-forecast-2030-2050>