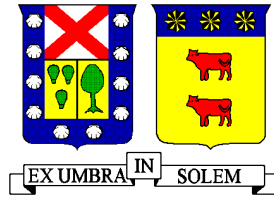


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



HIDRÓGENO VERDE, ENERGÍA SOLAR Y SU IMPLEMENTACIÓN
EN EL TRANSPORTE EN MINERÍA A CIELO ABIERTO CHILENA

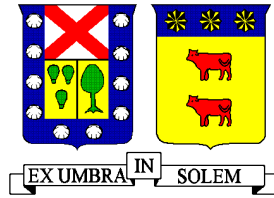
JAVIER ANTONIO SALVADOR COBO

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Luis Felipe Orellana

Octubre 2022

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



HIDRÓGENO VERDE, ENERGÍA SOLAR Y SU IMPLEMENTACIÓN
EN EL TRANSPORTE EN MINERÍA A CIELO ABIERTO CHILENA

Memoria de titulación presentado por
JAVIER ANTONIO SALVADOR COBO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Luis Felipe Orellana

Profesor Co-Guía
Adeline Delonca

Octubre 2022

Resumen

El consumo de energía a nivel nacional está marcado por la industria minera, llegando a consumir cerca del 16% del total de energía, sumando su procedencia tanto eléctrica como fósil. De esta manera, la industria minera es la de mayor consumo a nivel nacional. A su vez, las empresas mineras cuya explotación se produce mediante minería a cielo abierto, consume un 74% del consumo propio de la industria, lo que la posiciona como un actor relevante para el diseño y ejecución de acciones en torno al proceso de descarbonización.

El presente estudio busca relacionar la energía solar como base para la producción de Hidrógeno Verde [H_2] en territorio nacional, y con ello, favorecer su posterior uso en la industria de la minería a cielo abierto. El uso de este combustible alternativo en la industria se verificará con la comparación entre matrices energéticas construidas en base a distintas distribuciones en su uso entre combustibles fósiles e Hidrógeno Verde. Esto se realizará con el fin de realizar un análisis cuantitativo en cuanto a los costos que conlleva el uso de combustibles en cada matriz como también las dificultades que se presenten para poder emplearla. A lo anterior, se suma, una comparación en la cantidad de gases efecto invernadero, en especial dióxido de carbono, entre cada matriz. Esto con el fin de poder realizar una estimación de los beneficios que conlleva la implementación de este tipo de combustible en la industria.

Para ello, en este trabajo se presentan de cinco escenarios potenciales de penetración de hidrógeno en minería, considerando parámetros de consumo de combustible y emisiones de gases enfocados en la minería a cielo abierto chilena. Los escenarios se enfocan en el proceso de carguío y transporte en minería a cielo abierto, y considera una flota de 50 camiones de extracción de alto tonelaje o CAEX, con una capacidad de 300 toneladas de carga, potencia de 2.000 [kW] y un estanque con capacidad cercana a los mil galones. La introducción de H_2 en dicha flota variara su como combustible distribuyéndose en 0%, 10%, 25%, 50% y 100% del total de la flota para los cinco es respectivamente. En base a esto, se realizará una comparación en el costo total de implementación y la cantidad de emisiones por cada caso. La mina modelo donde se emplazarán los movimientos tiene una producción de 85.000 toneladas de fino al año y un movimiento mina promedio mensual de 11.2 millones de toneladas de material, lo que la califica como gran minería.

Este trabajo de memoria de título concluye en una reducción de costos de cerca de 24% en el total de inversión en combustibles pasando de una flota completamente potenciada por combustibles fósiles hacia una flota potenciada por Hidrógeno Verde, traduciéndose en cerca de los 8 millones de dólares anuales, para una flota de 50 equipos. Respecto de las emisiones se estima una reducción total, llegando a la carbono neutralidad una vez implementado el combustible verde en toda la flota, resultando en un total de 250.000 toneladas de dióxido de carbono anuales que no serán emitidas hacia la atmosfera, comparando los escenarios de 0 y 100% de flota utilizando hidrógeno verde como combustible.

Abstract

Energy consumption at the national level is marked by the mining industry, consuming close to 16% of total energy, both from electricity and fossil fuels. Thus, the mining industry is the one with the highest consumption at national level. In turn, mining companies whose exploitation is produced by open-pit mining, consumes 74% of the industry's own consumption, which positions it as a relevant actor for the design and implementation of actions around the decarbonization process.

The present study seeks to relate solar energy as a basis to produce Green Hydrogen [H₂] in national territory, and with this, favor its subsequent use in the open-pit mining industry. The use of this alternative fuel in the industry will be verified with the comparison between energy matrices built based on different distributions in its use between fossil fuels and Green Hydrogen. This will be done to perform a quantitative analysis in terms of the costs involved in the use of fuels in each matrix as well as the difficulties that arise to be able to use it. In addition to the above, a comparison of the amount of greenhouse gases, especially carbon dioxide, between each matrix will be made. This to be able to estimate the benefits of implementing this type of fuel in the industry.

For this purpose, this work presents five potential scenarios of hydrogen penetration in mining, considering parameters of fuel consumption and gas emissions focused on Chilean open-pit mining. The scenarios focus on the loading and transportation process in open pit mining and consider a fleet of fifty high tonnage extraction trucks or CAEX, with a capacity of three hundred tons of cargo, power of 2,000 [kW] and a tank with a capacity of about one thousand gallons. The introduction of H₂ in the fleet will vary as a fuel and will be distributed as 0%, 10%, 25%, 50% and 100% of the total fleet for the five years, respectively. Based on this, a comparison will be made on the total cost of implementation and the amount of emissions for each case. The model mine where the movements will be located has a production of 85,000 tons of fines per year and an average monthly mine movement of 11.2 million tons of material, which qualifies it as a large mine.

This title memory work concludes in a cost reduction of about 24% in the total investment in fuels, going from a fleet completely powered by fossil fuels to a fleet powered by Green Hydrogen, translating into about eight million dollars per year, for a fleet of fifty pieces of equipment. Regarding emissions, a total reduction is estimated, reaching carbon neutrality once the green fuel is implemented in the entire fleet, resulting in a total of 250,000 tons of carbon dioxide per year that will not be emitted into the atmosphere, comparing the scenarios of 0 and 100% of the fleet using green hydrogen as fuel.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre por siempre instaurar que la educación es el único camino para lograr y obtener todo lo que uno se proponga. A mi padre por ser el motivador para seguir adelante en cualquier ámbito de la vida.

A mi amada esposa por su apoyo, compañía, motivación e incomparable incondicionalidad.

A mis queridas tías y padrino, por siempre ser un ejemplo de vida y superación.

A mis amigos Juan Carlos Aburto y Bastián Azuga por ser el apoyo necesario en las largas jornadas de estudio, traspasos y desafíos propios de la universidad y a Tomas Castro, Fernanda Fierro y Paula Parada, que antes que el sueño de ser profesional existiera, ya eran el apoyo que toda persona necesita en un día a día.

Gracias totales.

Agradecer al profesor Luis Felipe y al EGL por darme la oportunidad de trabajar en un tema vanguardista y aceptar el desafío que conlleva.

A la profesora Adeline por su apoyo, consejos e increíble gestión a lo largo del tiempo empleado en este trabajo y por acceder a ser parte de la comisión.

“Sólo el estudio, el conocimiento y la preparación, serán las herramientas con que se forjará la superación individual y familiar, el crecimiento y consolidación de las empresas y la transformación de la sociedad, convirtiendo a nuestro país en una nación próspera y respetada” **Eddy Cobo, 2008.**

“I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light, of an intensity of which coal is not capable” **Jules Verne, 1874**

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN Y PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivos Generales.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 ALCANCES.....	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
2.1.1 Descripción General	4
2.1.2 Formas de Enfrentar el Cambio Climático	4
2.2 ENERGÍAS RENOVABLES	5
2.2.1 Energías Renovables Convencionales	5
2.2.2 Energías Renovables No Convencionales	5
2.2.3 Producción de Hidrógeno	6
2.2.4 Hidrógeno Verde	9
2.2.5 Energía Solar	9
2.2.6 Mercado Nacional de Energías Renovables	10
2.3 MINERÍA A CIELO ABIERTO.....	10
2.3.1 Localización.....	11
2.3.2 Uso de energía en operación mina.....	12
2.3.3 Operaciones Unitarias en Minería a Cielo Abierto	14
3. HIDRÓGENO VERDE	17
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	17
3.2 FORMAS DE PRODUCCIÓN A NIVEL NACIONAL	18
3.2.1 Hidrógeno Verde proveniente de Energía Solar	18
3.2.2 Hidrógeno Verde proveniente de Energía Eólica	19
3.3 DEMANDA ACTUAL DEL HIDRÓGENO	19
3.3.1 Proyecciones.....	20
3.4 INFRAESTRUCTURA DE REABASTECIMIENTO.....	21
3.4.1 Tipo de estaciones	21
3.4.2 Módulos de suministro	21
3.5 HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	23
3.5.1 Comparación energética con combustibles fósiles.....	24
3.5.2 Comparación económica con combustibles fósiles	24
3.5.3 Comparación de emisiones con combustibles fósiles.....	25
3.6 DIFICULTADES DE IMPLEMENTACIÓN	25
4. METODOLOGÍA.....	26
5. RAZONES DEMOSTRATIVAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN MINERÍA CIELO ABIERTO CHILENA	29

5.1	PARÁMETROS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN	29
5.2	CÁLCULO DE ASPECTOS ECONÓMICOS	29
5.3	CREACIÓN DE CASO BASE	29
5.3.1	Producción	30
5.3.2	Flota de Equipos	30
5.3.3	Costos de implementación y utilización	31
5.4	ESCENARIO 1 (E0%).....	31
5.4.1	Emisiones.....	32
5.4.2	Costos	32
5.5	ESCENARIO 2 (E10%).....	32
5.5.1	Emisiones.....	33
5.5.2	Costos	33
5.6	ESCENARIO 3 (E25%).....	33
5.6.1	Emisiones.....	33
5.6.2	Costos	34
5.7	ESCENARIO 4 (E50%).....	34
5.7.1	Emisiones.....	34
5.7.2	Costos	34
5.8	ESCENARIO 5 (E100%).....	35
5.8.1	Emisiones.....	35
5.8.2	Costos	35
6.	PROYECCIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE EN LA MINERÍA	37
6.1	TECNOLOGÍAS RESPECTIVAS DE LA TRANSICIÓN HACIA EL HIDRÓGENO VERDE COMO COMBUSTIBLE	37
6.1.1	Métodos de Empleo	37
6.1.2	Costos de instauración de nuevas tecnologías	38
6.2	PROCESOS ACTUALES A NIVEL NACIONAL Y EN EL SECTOR MINERO	39
6.2.1	Procesos actuales y estrategia de producción a nivel nacional.....	39
6.2.2	Procesos actuales en la minería	40
6.3	PROYECCIONES DE IMPLEMENTACIÓN DE H ₂ V EN LA INDUSTRIA MINERA	41
7.	DISCUSIÓN.....	44
8.	CONCLUSIONES	46
8.1	RECOMENDACIONES.....	46
9.	REFERENCIAS	48

Índice de Figuras

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CONSUMO DE LA INDUSTRIA MINERA EN COMPARACIÓN CON LA TOTALIDAD DE SECTORES A NIVEL NACIONAL [3].....	1
FIGURA 2: ESQUEMA BÁSICO DE LA ELECTROLISIS [15]	8
FIGURA 3: ESQUEMA RESUMIDO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE [17].....	9
FIGURA 4: ESQUEMA RESUMIDO DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOLAR [17].	9
FIGURA 5: REPRESENTACIÓN DE CONSUMO DE FUENTES RENOVABLES SOBRE EL CONSUMO PRIMARIO [19].	10
FIGURA 6: DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN EN PRODUCCIÓN DE MINERÍA A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEA [20].	11
FIGURA 7: MAPA DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS EN CHILE [21].	12
FIGURA 8: CONSUMO NACIONAL DE ENERGIA POR PROCESO [3].	13
FIGURA 9: CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS COMBUSTIBLES EN LA INDUSTRIA MINERA. [3].	13
FIGURA 10: CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA MINERA [3].	14
FIGURA 11: ESQUEMA GENERAL DE OPERACIONES UNITARIAS MINA.	15
FIGURA 12: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE COSTOS DE OPERACIONES UNITARIAS MINA [23].	16
FIGURA 13: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE COSTOS EN EL ORIGEN DE OPERACIONES UNITARIAS MINA [23].	16
FIGURA 14: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DEMANDA GLOBAL DE ENERGÍA PROVENIENTE DEL HIDRÓGENO VERDE [26].	19
FIGURA 15: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE PARA EL AÑO 2030 [26].	20
FIGURA 16: PROYECCIONES DE MERCADOS CHILENOS DE HIDRÓGENO Y DERIVADOS DESDE EL AÑO 2025 HASTA EL AÑO 2050 EN [BUSD] [26].	21
FIGURA 17: PROCESO DE MÓDULOS DE SUMINISTRO.	22
FIGURA 18: ENERGÍA CONTENIDA EN DISTINTOS COMBUSTIBLES POR CADA UNIDAD DE KILO Y LITRO [30].	24
FIGURA 19: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VOLÚMENES UTILIZADOS POR COMBUSTIBLES EN DIFERENTES ESTADOS FÍSICOS [31].	25
FIGURA 20: DIAGRAMA DE METODOLOGÍA A IMPLEMENTAR EN EL PRESENTE ESTUDIO.	26
FIGURA 21: EVOLUCIÓN TOTAL DE TCO PARA CAMIONES CAEX, BASADO EN CAMIONES DE 300 TONELADAS [31].	38
FIGURA 22: CAMIÓN A HIDRÓGENO VERDE [39].	41
FIGURA 23: PLANTA HIDRÓGENERA EN LAS TÓRTOLAS [39].	41
FIGURA 24: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y EMISIONES PARA LOS AÑOS 2022 – 2030 [34].	42

Índice de Tablas

TABLA 1: PRODUCCIÓN DE MINERALES METÁLICOS POR REGIÓN, SEGÚN TIPO DE MINERAL [21]. ..	11
TABLA 2: INFORMACIÓN DE PRINCIPALES YACIMIENTOS DE CHILE [21].....	12
TABLA 3: TABLA COMPARATIVA EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO [H ₂] [24]......	17
TABLA 4: DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES POR REGIÓN EN CHILE [25]......	18
TABLA 5: MOVIMIENTO MINA ESTIPULADO POR MES Y RAZÓN ESTÉRIL MINERAL (REM).	30
TABLA 6: CANTIDAD Y TIPO DE CAMIONES EN CADA ESCENARIO RESPECTIVO DE COMPARACIÓN..	31
TABLA 7: TABLA RESUMEN DE CONSUMO, COSTOS TOTALES Y EMISIONES DE PRIMER ESCENARIO.	32
TABLA 8: TABLA RESUMEN DE CONSUMO, COSTOS TOTALES Y EMISIONES DE SEGUNDO ESCENARIO.	33
TABLA 9: TABLA RESUMEN DE CONSUMO, COSTOS TOTALES Y EMISIONES DE TERCER ESCENARIO.	34
TABLA 10: TABLA RESUMEN DE CONSUMO, COSTOS TOTALES Y EMISIONES DE CUARTO ESCENARIO.	34
TABLA 11: TABLA RESUMEN DE CONSUMO, COSTOS TOTALES Y EMISIONES DE QUINTO ESCENARIO	35
TABLA 12: DEMOSTRACIÓN GRAFICA DE LA COMPARACIÓN ENTRE ESCENARIOS EN CUANTO A CONSUMO Y COSTOS.	36
TABLA 13: DESCRIPCIÓN DE ESTRATEGIA NACIONAL DE PRODUCCIÓN Y DESARROLLO DE HIDRÓGENO [26].	39
TABLA 14: DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS SEIS PROYECTOS MÁS IMPORTANTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN CHILE [26].	40

1. Introducción

1.1 Motivación y Problemática

Actualmente el mundo está sumergido gravemente en el cambio climático, lo que ha llevado a las grandes industrias a acelerar el proceso de descarbonización de sus matrices energéticas, la cual está compuesta principalmente por fuentes fósiles. Esta reducción resulta en una disminución de las emisiones que aportan a este cambio climático mundial [1]. Chile está dentro de los más vanguardistas en el cambio hacia una matriz libre de carbono. Además, posee un gran potencial para la generación de energías renovables y libres de gases invernadero debido a su vasto y variado territorio, pasando de los desiertos más áridos en el norte del país como a vientos caudalosos en el extremo sur. De esta forma Chile es uno de los países potencialmente más capacitados para la implementación de este tipo de energías renovables no convencionales [ERNC] [2].

Según COCHILCO [2022], a nivel nacional, el consumo de energía está marcado por la industria minera. Lo anterior, debido a que el 16% del consumo total es por parte de esta industria. A su vez, diferenciando dentro de las fuentes, un 54% de energía es de origen eléctrico, y su complemento de 46% es de origen combustible en todas sus variantes, es decir petróleo, gas, entre otros. Se puede apreciar en la Figura 1 una representación gráfica del consumo energético de la industria minera en comparación con el resto de los sectores que abarcan la totalidad de industrias a nivel nacional.

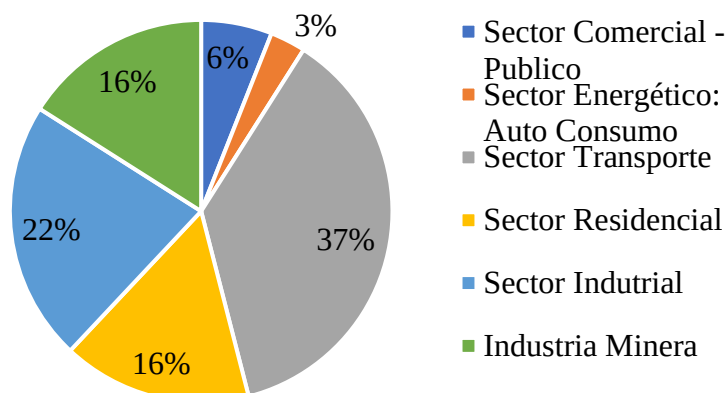


Figura 1: Representación gráfica del consumo de la industria minera en comparación con la totalidad de sectores a nivel nacional [3]

Respecto de los sistemas mineros, la minería a cielo abierto es el principal consumidor de energía por un margen amplio, esto debido a que abarca cerca del 76% de consumo de energía total de la industria minera [4].

En materia de diésel, el método de extracción a cielo abierto es por lejos el principal consumidor, comprendiendo un total de 74% del consumo de combustible en la industria minera [3], esto debido

al gran tamaño de sus equipos tales como equipos de carga y transporte que varían en capacidad entre 290 y 320 toneladas y cantidad de material que está en constante movimiento en este tipo de extracción.

Estos datos ratifican la urgencia de pensar en la extracción a cielo abierto como prioridad a la hora del cambio en la matriz energética del rubro minero como también a nivel nacional.

Como se mencionó anteriormente, las energías renovables se convierten en la solución hacia el cambio a una matriz energética basada en energías limpias, sin emisiones. La energía solar se presenta como punto angular en este cambio, esto por su fácil implementación en materia de electricidad y su capacidad de producción actual a nivel nacional, además de sus favorables proyecciones [5]. Sumado a esto, nacen nuevas implementaciones como lo es el hidrógeno verde, el cual, si bien hoy en día ya tiene aplicaciones, no son específicamente en su faceta verde, más bien es utilizado en variantes contaminantes como se denominan el hidrógeno gris y azul, estas son utilizadas tanto en las industrias de fertilizantes como base del amoníaco como también en la refinación combustibles fósiles [5].

El hidrógeno verde [H_2V] se presenta como una de las principales opciones a nivel nacional para el cambio en la canasta energética, esto debido a su capacidad de producción en suelo nacional, al igual que su reducido costo de producción gracias a las causas expuestas anteriormente. Las propiedades energéticas del hidrógeno verde pueden ser significativamente mayores a las de los combustibles fósiles y sin una huella de carbón alguna [6]. De hecho, sus residuos son agua en estado gaseoso y líquido, lo que lo vuelve en una alternativa tentadora para el proceso de cambio hacia energías renovables tanto a nivel a nacional como mundial.

Para poder verificar la viabilidad de la utilización del hidrógeno verde como combustible en la industria minera a cielo abierto, el presente estudio establecerá una comparación entre una matriz energética contemporánea basada en combustibles fósiles, con un matriz estructurada en su totalidad con hidrógeno verde como combustible, a su vez también con una matriz híbrida que complementa combustibles fósiles e hidrógeno verde. Esto permitiendo una comparación económica total de los procesos unitarios de transporte dentro de la operación mina como también una comparación directa de la emisión de gases efecto invernadero de cada matriz, la cual se realizará gracias a la creación de un caso base, basado tanto en los consumos de energía contemporáneos de la industria, como también en las proyecciones de producción del hidrógeno verde a nivel nacional considerando sus dificultades de implementación en la industria de la minería a cielo abierto. Logrando una comparación lo más certera posible.

1.2 Objetivos

A continuación, se presentan tanto objetivos generales como específicos de la presente memoria.

1.2.1 Objetivos Generales

Evaluar a nivel conceptual el impacto de la implementación de hidrógeno verde en la industria de la minería a cielo abierto en Chile, enfocado en la operación unitaria de transporte mina.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del estudio son:

- Diferenciar las partes que constituyen el proceso de producción de hidrógeno verde a través de la energía solar con producción en territorio chileno.
- Determinar el estado actual del hidrógeno verde a nivel país y operacional en minería a cielo abierto.
- Evaluar el efecto/impacto directo del hidrógeno verde en términos de costos y emisiones en la operación unitaria de transporte de la minería a cielo abierto.
- Generar una mina modelo de minería a cielo abierto, y escenarios de introducción de hidrógeno verde para una comparación de las operaciones de transporte en minería a cielo abierto, que permitirán potencialmente el uso del hidrógeno verde en su matriz actual de energía.
- Estudiar las barreras actuales para la implementación de hidrógeno verde en la industria minera de cielo abierto, y como superarlas.

1.3 Alcances

- Este estudio considera proyecciones sobre el uso de los combustibles alternativos con el fin de extrapolar los distintos escenarios posibles en un futuro a corto, mediano y largo plazo.
- Se considera una operación minera a cielo abierto representativa del sector minero en Chile. La operación minera considera una producción de 85.000 toneladas de fino al año y un movimiento mina promedio mensual de 11.2 millones de toneladas de material.
- El presente estudio se basa en las operaciones unitarias de carguío y transporte.

2. Antecedentes

En el presente apartado se busca recopilar los estudios que han sido realizados sobre el cambio climático y las energías renovables enfocadas en la descarbonización y reducción del consumo de energía de origen fósil en la industria minera.

2.1 Cambio Climático

2.1.1 Descripción General

El cambio climático se define como *“La variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos, ..., de la composición de la atmósfera o del uso del suelo”*, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC] [7]

A su vez, según la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático [CMNUCC] se define como el *“Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”*. [8].

2.1.2 Formas de Enfrentar el Cambio Climático

El cambio climático se ha convertido en una crisis global que alcanza tanto perspectivas ambientales como políticas, sociales y económicas. Hoy en día existen varios acuerdos en conjunto que asocian a países del mundo con el fin de lograr objetivos en torno a las emisiones hacia la atmosfera. La Organización de las Naciones Unidas, se basa en tres instrumentos jurídicos a la hora de acoplar a las naciones a combatir el cambio climático, en primera instancia la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMMUCC) la cual abarca un total de 197 países con un objetivo final de prevenir cualquier interferencia humana peligrosa en el sistema climático, en segundo lugar se encuentra el Protocolo de Kyoto, el cual alberga a 192 países y cumple la función de reducir las emisiones por dichos países hacia la atmosfera y en último lugar se encuentra el Acuerdo de París, el cual proviene de la CMMUCC, con el fin de incitar a todas las naciones hacia combatir el cambio climático y acelerar las acciones e inversiones necesarias para lograr un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono [8].

Como se menciona anteriormente el elemento con mayor potencial de daño hacia la atmosfera es el carbono, las emisiones de carbono generalmente provienen del gas Dióxido de Carbono (CO₂), esto desde la emisión por el proceso de combustión de combustibles fósiles. Es por esto por lo que el proceso que ha tomado más fuerza en cuanto a la mejora sobre el cambio climático es el proceso llamado descarbonización, el cual consiste en el proceso por el cual países, individuos u otras entidades apuntan a lograr una existencia cero de carbono fósil, de la eliminación de consumo energético proveniente de combustibles fósiles [9].

2.2 Energías Renovables

Estas energías son provenientes de fuentes que se consideran inagotables, es decir, en sus procesos de transformación y uso, no se consumen, gracias a que la demanda humana no es la necesaria para hacerlo o por su capacidad de regenerarse durante el tiempo. Si bien existen fuentes de energías renovables como hidráulicas, solar, eólica y oceánicas, se pueden catalogar como energías renovables la energía proveniente de la biomasa, energía geotérmica y los bio combustibles [10]. Chile gracias a tener la mayor radiación a nivel mundial en la zona norte, fuertes vientos hacia la zona sur del país para desarrollar energía eólica, una basta costa con un tremendo potencial de energía marina, grandes capacidades de biogás y recursos geotérmicos a lo largo de la cordillera hacen que se proyecte como potencia mundial en el rubro de las energías renovables [11]. Las energías renovables son clasificadas según su grado de desarrollo tecnológico para su aprovechamiento y su predominancia en los mercados energéticos.

2.2.1 Energías Renovables Convencionales

Son las energías renovables tradicionales que utilizan directamente las fuentes sin un mayor proceso de separación por medio de la tecnología, la más importante a nivel nacional es la energía hidráulica a gran escala [10], sin embargo, gracias a las cualidades del territorio nacional también se puede nombrar a la energía solar, esto debido gracias a las altas radiaciones que se encuentran en la zona norte del país.

2.2.2 Energías Renovables No Convencionales

Estas energías necesitan de un desarrollo tecnológico mayor para obtener el resultado esperado, en territorio nacional se consideran como no convencionales a las energías eólica, pequeña hidroeléctrica (hasta 20MW), biomasa, biogás, geotermia, solar y energía proveniente de los mares [10] siendo significativamente la energía solar la predominante en suelo nacional.

El hidrógeno es un elemento bastante utilizado en la industria mundial, sus principales funciones son el uso en la refinación de combustibles fósiles, producción de amoníaco, industrias del acero. Sin embargo, se han desarrollado nuevos usos de este elemento con el tiempo, en las cuales el hidrógeno se combustiona de forma directa o también utilizarlo como productor de electricidad a través de las llamadas celdas de combustible, las cuales combinan combustible con hidrógeno y oxígeno. Este uso como combustible se desarrolla como estanques propios de hidrógeno además de las celdas previamente mencionadas.

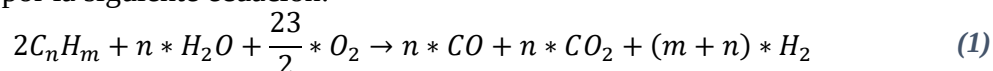
Nuevas incursiones en su uso son almacenar como producir energía eléctrica y térmica proveniente del elemento, producción de fertilizantes e insumos mineros [12].

2.2.3 Producción de Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento que no se encuentra en estado primario o elemental en la tierra, esto quiere decir que no se puede recolectar de manera libre como otros elementos, es por esto por lo que para producir el mismo debe haber un proceso que puede ser a su vez químico como bioquímico. Estos procesos de producción varían según la materia prima o reactivos en cada caso, los más comunes son los hidrocarburos, con los respectivos procesos de oxidación, gasificación y reformación del vapor de gas.

A su vez y en donde se enfocará este estudio es en su producción desde el agua como materia prima. A continuación, se explican mayor detalle los procesos más recurrentes y sus respectivas diferencias.

El proceso de oxidación de hidrocarburos que se caracteriza por una reacción exotérmica de oxidación regida por la siguiente ecuación:



Este proceso es basado en la incorporación de oxígeno, algún hidrocarburo en estado líquido o gaseoso y vapor de agua a un reactor de presiones elevadas. Se utiliza en la mayoría de los casos para la obtención de la molécula de hidrogeno desde hidrocarburos pesados, que no pueden ser reformados en vapor.

En cambio, la gasificación de carbón como tal se basa en dos reactores en serie, donde en el primero es ingresado carbón a temperaturas sobre los 1000 °C con el fin de que el carbón pase a un estado gaseosos, mencionar que esta reacción es controlada con el fin de que no se genere combustión, una vez gaseoso es mezclado con agua entregando como resultado hidrógeno y monóxido de carbono, como es explicado en la siguiente ecuación:



Una vez transcurrido el proceso en el primer reactor, los productos son ingresados a un segundo reactor a temperatura de 400 °C obteniendo como producto hidrógeno y dióxido de carbono, como se expresa en la siguiente ecuación:



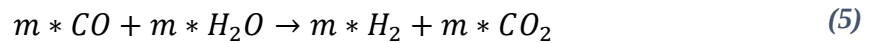
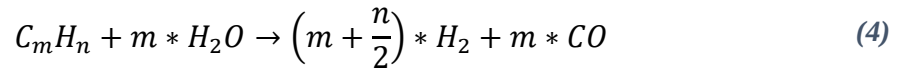
Este proceso es uno de los menos convencionales debido a alta cantidad de gases efecto invernadero que son expuestos hacia la atmosfera, en particular el dióxido de carbono por lo que deberían ser recolectados para una viabilidad ecológica [13].

La reformación de vapor de gas o también llamada SR o “*Steam Reforming*”, es un proceso que también se produce en un par de reacciones como el proceso de gasificación de vapor para mejorar su eficiencia, este proceso es de los más ocupados debido a sus bajos costos y altas eficiencia en comparación con los procesos previamente mencionados. En primera instancia se utiliza un reactor catalítico para producir hidrógeno, a su vez también se obtiene monóxido de carbono el cual será

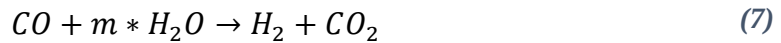
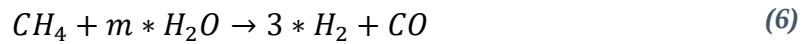
el reactivo en la segunda reacción con el fin de producir nuevamente hidrógeno y dióxido de carbono [14].

Este proceso se basa en hidrocarburos ligeros como lo pueden ser el etano, metano y gas natural, reaccionándolos con agua.

Este método no es aplicable a hidrocarburos con alta presencia de impurezas, a continuación, se presentan las respectivas ecuaciones que demuestran el proceso de reacciones ocurridas en ambas fases, tanto general como específicamente ocupando el reactivo de gas natural:

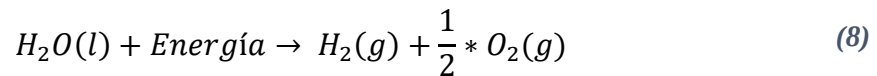


En su forma general.



Específicamente para la utilización de reactivos agua y metano.

Como se ha mencionado anteriormente el hidrógeno no se encuentra por sí solo en estado natural por lo que debe generarse a partir de productos y reacciones respectivas, si bien los procesos anterior utilizan el agua como reactivo en dichas reacciones, existen procesos donde solo se utiliza el agua como material primo para la extracción del hidrógeno, para esto se necesitara energía la cual será proveniente desde electricidad o calor, la reacción general para estos procesos se describe a continuación:



Como se observa en la ecuación, no existe una emisión de gases efecto invernadero como subproducto de la reacción.

La electrolisis es un proceso en el cual se sumergen dos electrodos en una solución acuosa llevando un potencial eléctrico que provoca la separación del hidrogeno y el oxígeno. Esta separación se debe a que el campo eléctrico externo, que se genera desde la diferencia de tensión entre los electrodos, es mayor que el campo eléctrico molecular, esto genera finalmente una ruptura en el enlace covalente del agua [15]. En la Figura 2, se representa un esquema básico del proceso de electrolisis.

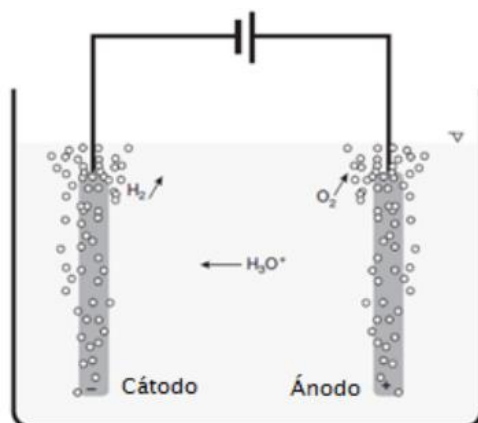


Figura 2: Esquema básico de la electrolisis [15]

La termólisis en cambio es un proceso por el cual se eleva la temperatura del agua hasta un punto en donde la molécula del agua se rompe separando sus enlaces, por lo que el hidrógeno y el oxígeno son separados, esto se logra cerca de los 2200 °C de temperatura.

El proceso consiste en el contacto entre una superficie a elevadas temperaturas y el agua con el fin de que absorba gran cantidad de energía, esto se debe hacer con la observación de que los gases emitidos deben ser extraídos rápidamente debido a que esta reacción es reversible, es decir, el hidrogeno y el agua podrían recombinarse en agua y liberar grandes cantidades de energía, incluso llegando a reacciones explosivas [16].

Existen varios métodos de extracción del hidrógeno una vez la molécula de agua ha sido dividida, a continuación, se mencionan los más utilizados:

- Usar un estanque rotatorio a velocidad angular constante, esto genera que la fuerza centrífuga mueva el oxígeno hacia los bordes del estanque mientras que el hidrógeno al ser más liviano se queda en el centro.
- Electroforesis, proceso por el cual se emplea un potencial eléctrico en una membrana semipermeable, a modo que el gradiente de potencial genere la separación de los gases.
- Disminuir de manera considerable la temperatura de los gases y estabilizarlos.
- Membranas formadas por una aleación de paladio y plata diseñadas con el fin de absorber hidrógeno de manera selectiva a bajas temperaturas.
- Membranas refractarias compuestas por microporos con la funcionalidad de generar una separación selectiva de las moléculas.

Es de mencionar que, según las condiciones de cada operación, los resultados esperados y en conjunto con los recursos disponibles, se pueden utilizar diferentes métodos e incluso combinaciones entre los mismos [16].

Una vez mencionados todos los procesos de producción de hidrógeno, se aprecia que la gasificación del carbón, termólisis y el método de reformado de vapor de gas natural se deben utilizar temperaturas elevadas de mínimo 800 °C, esto significa, una necesidad de un combustible que proporcione dicha cantidad de energía, por lo que, en teoría aumentaría la huella de carbono

en dicho proceso, además de los altos costos en equipamientos para cada proceso respectivamente. Es por esto por lo que se descartan para la producción de hidrógeno a baja escala.

2.2.4 Hidrógeno Verde

Este tipo de hidrógeno utiliza el agua como materia prima, luego de la separación de sus componentes: hidrógeno y oxígeno y liberando este mismo oxígeno a la atmosfera. Si la energía necesaria para realizar este proceso proviene desde una energía renovable, se habla de “Hidrógeno Verde”, el cual se convierte en un proceso limpio, debido a que no produce emisiones dañinas y su desecho de combustión es agua en su forma líquida y gaseosa [6]. Se puede apreciar el proceso de producción de hidrógeno verde de manera esquemática en la siguiente Figura.

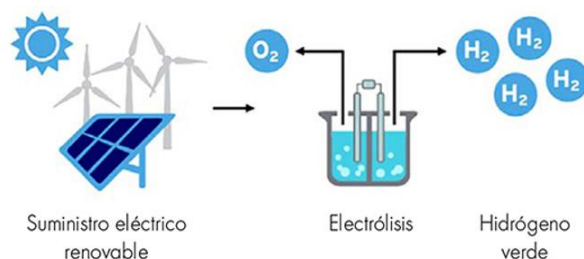


Figura 3: Esquema resumido de producción de hidrógeno verde [17].

2.2.5 Energía Solar

El sol es la fuente de energía más constante, gracias a su abundancia y a la cantidad de irradiación que genera sobre la capa exterior de la atmosfera. La energía que es percibida en la superficie de la tierra es denominada irradiancia. La principal barrera es que solamente se recibe durante las horas del día por lo que se debe complementar con fuentes externas de energía o asociarla con métodos de almacenamiento. A nivel nacional, la zona norte del país alberga la mayor incidencia solar del mundo, concentrándose principalmente en el desierto de Atacama y sus alrededores [18]. De igual manera que en el apartado anterior, en la siguiente Figura se aprecia este proceso de manera esquemática.

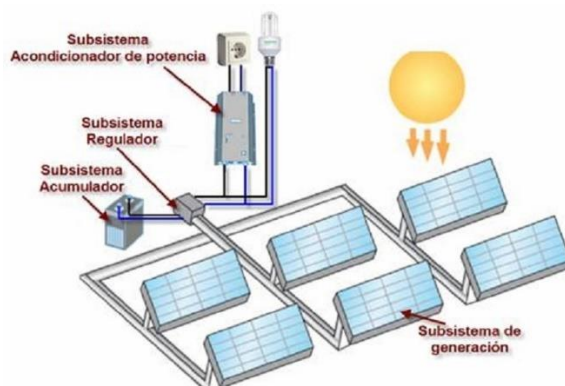


Figura 4: Esquema resumido de producción de energía solar [17].

2.2.6 Mercado Nacional de Energías Renovables

El desarrollo del país en todas sus aristas es sin duda, un proceso que necesita de manera indispensable el consumo de energías, esto va de la mano con un desafío ambiental y también en cuanto a la inversión sobre tecnologías renovables y limpias lo que fomenta la demanda hacia este tipo de energías.

Como se puede apreciar en la Figura 5, la evolución del consumo en torno a las fuentes renovables en comparación con el total de consumo primario ha aumentado gradualmente en los últimos 12 años, cabe mencionar, que la energía primaria abarca no solamente la energía utilizada en la producción de energía de eléctrica, sino que el total consumo energético primario [19]. Como fuentes renovables son consideradas eólica, solar, geotérmica, biomasa y residuos.

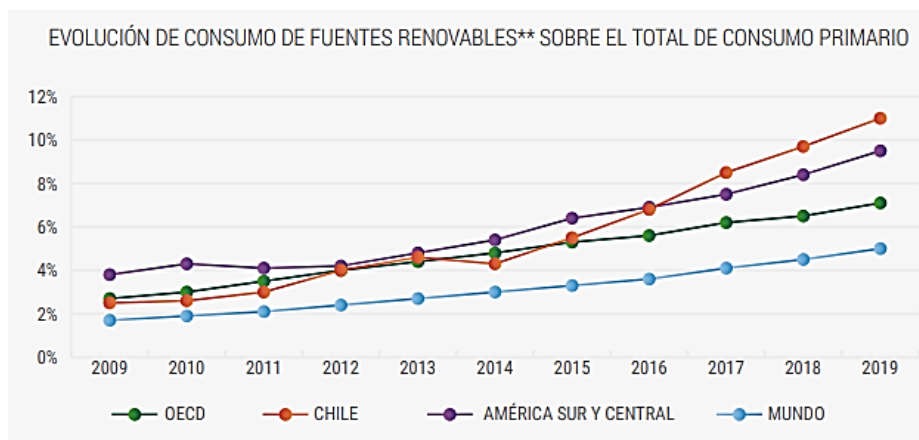


Figura 5: Representación de consumo de fuentes renovables sobre el consumo primario [19].

En cuanto al consumo propio de las energías renovables en el país, el aumento es evidente pasando desde un 2.3% del total de consumo en 2009 llegando aproximadamente a un 11.4% en 2019 [10]. Además, Chile presenta una fuerte dependencia energética debido a la creciente necesidad de importar petróleo, derivados y gas natural para satisfacer su demanda interna y mantener su nivel de crecimiento económico, más de un 50% de la energía del país es proveniente del petróleo crudo y gas natural y sobre un 60% de ese consumo proviene de importaciones [19]. Es por esta razón que la utilización de la potencialidad del territorio nacional en cuanto a energías renovables se vuelve un factor sumamente importante también respecto de la dependencia energética y el crecimiento económico.

2.3 Minería a Cielo Abierto

La minería a Cielo abierto o también denominada a rajo, son las explotaciones u aprovechamientos mineros en los que la explotación y extracción minera se desarrolla en la superficie de la tierra. Este tipo de explotación minera se realiza cuando se trata de yacimientos o mantos potentes, cuya mineralización aflora o se encuentra cercana a la superficie.

Este método es el más ocupado en el país actualmente, desde la explotación de metales básicos hasta metales preciosos, representando cerca del 85% de la producción nacional de cobre [20] como se aprecia en la Figura 6. Es un método minero selectivo esto debido, a que todo el volumen de las envolventes debe ser removido, se puede separar fácilmente el material mineral del estéril.

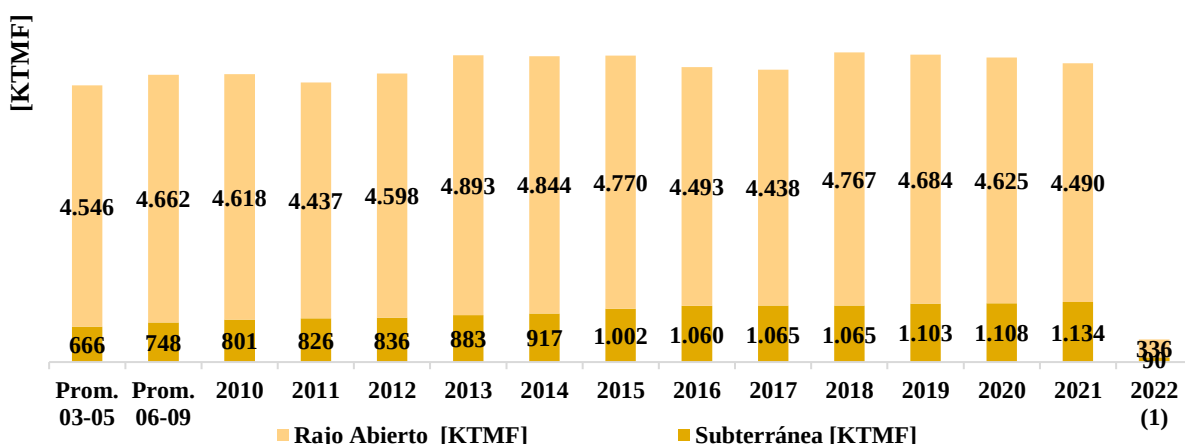


Figura 6: Demostración gráfica de la comparación en producción de minería a cielo abierto y subterránea [20].

2.3.1 Localización

Las cualidades geológicas que presenta el norte del territorio nacional incluyendo tanto norte grande como norte chico, permiten que se desarrolle gran parte del sector minero en dicha zona. Se puede apreciar en la Tabla 1 la cantidad de minerales metálicos extraídos por región, siendo preferentemente Antofagasta la con mayor producción, llegando a ser la minería el 33% del PIB de la región [21]. Cabe mencionar que el resto de las regiones no mencionadas en la tabla es por su nula actividad minera.

Tabla 1: Producción de minerales metálicos por región, según tipo de mineral [21].

Región	Cu [tmf]	Mo [tmf]	Au [Kg]	Ag [Kg]	Fe [Mineral tm]	Fe [tmf]	Pb [tmf]	Zn [tmf]
TOTAL	5.772.632	59.319	33.895	1.575.794	15.553.538	9.890.886	1.386	28.662
Arica y Parinacota	7.158	-	-	-	-	-	-	-
Tarapacá	398.046	3.755	-	-	-	-	-	-
Antofagasta	3.121.906	26.309	20.484	1.136.381	-	-	-	-
Atacama	446.265	3.029	5.037	89.538	13.724.275	8.671.979	-	-
Coquimbo	470.364	10.951	3.654	113.076	1.826.263	1.218.907	-	-
Valparaíso	260.354	2.224	534	81.075	-	-	-	-
Metropolitana	324.686	4.117	2.994	63.728	-	-	-	6.062
O'Higgins	443.413	8.875	1.091	88.609	-	-	-	-
Aysén	440	-	88	3.387	-	-	1.386	22.601
Magallanes	-	-	13	-	-	-	-	-

Como es de notar la producción está marcada en la zona norte del país independiente del mineral a extraer. En la Figura 7 esto se puede evidenciar de manera gráfica, donde se especifica la localización de las 23 grandes mineras en territorio nacional, tanto la ubicación, método de extracción y su respectiva producción anual se encuentran detallados en la Tabla 2 mostrada a continuación.

Tabla 2: Información de principales yacimientos de Chile [21].

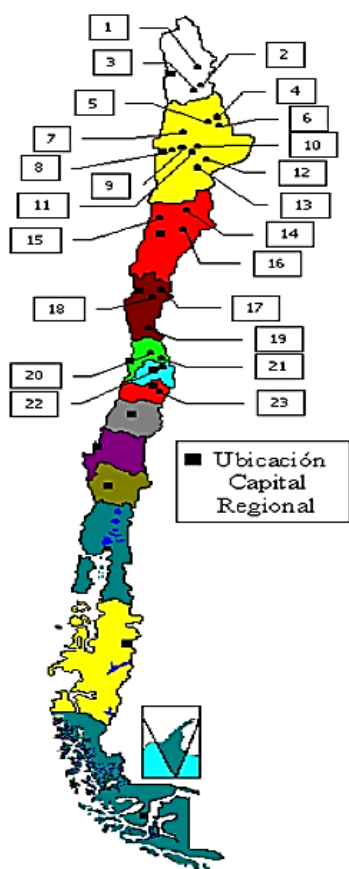


Figura 7: Mapa de los principales yacimientos en Chile [21].

	Yacimiento	Región	Método de Extracción	Producción Anual [Tm]
1	Cerro Colorado	Tarapacá	Rajo	104.200
2	Quebrada Blanca	Tarapacá	Rajo	13.400
3	Collahuasi	Tarapacá	Rajo	629.100
4	El Abra	Antofagasta	Rajo	71.900
5	R. Tomic	Antofagasta	Rajo	260.600
6	Chuquicamata	Antofagasta	Rajo/Subterránea	400.000
7	Michilla	Antofagasta	Rajo	19.500
8	Mantos Blancos	Antofagasta	Rajo	98.000
9	Lomas Bayas	Antofagasta	Rajo	73.900
10	Spence	Antofagasta	Rajo	146.700
11	El Tesoro	Antofagasta	Rajo	90.000
12	Escondida	Antofagasta	Rajo	1.187.300
13	Zaldívar	Antofagasta	Rajo	96.500
14	El Salvador	Atacama	Rajo	56.000
15	Manto Verde	Atacama	Rajo	53.000
16	Candelaria	Atacama	Rajo	173.500
17	El Indio	Coquimbo	Rajo	14.000
18	Andacollo	Coquimbo	Rajo	22.000
19	Pelambres	Coquimbo	Rajo	283.000
20	El Soldado	Valparaíso	Rajo	72.000
21	Andina	Valparaíso	Rajo/Subterránea	184.500
22	Los Bronces	Metropolitana	Rajo	181.000
23	El Teniente	O'Higgins	Subterránea	443.200

2.3.2 Uso de energía en operación mina

La industria minera es lejos la industria que más consume energía a nivel nacional, en gran parte por las dimensiones de esta, este consumo rodea cerca del 16% total de la energía consumida en Chile. Sin embargo, dentro la propia industria minera, la minería a cielo abierto es sin duda la que lleva la batuta en el consumo total de energía, en todos sus formatos, consumiendo cerca del 74% de energía total de la industria [3]. Se puede apreciar a continuación una comparación grafica entre el consumo de combustibles y electricidad según proceso en la industria.

Consumo Nacional de Energía por Proceso

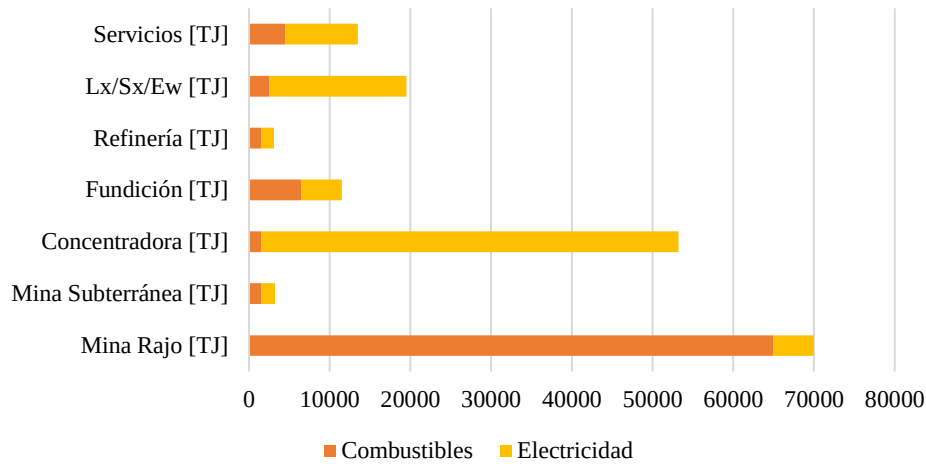


Figura 8: Consumo nacional de energía por proceso [3].

2.3.2.1 Consumo de Combustibles

Dentro del consumo total de energía de la industria minera, cercano al 46.7% proviene desde el consumo de combustibles, esto se traduce en alrededor de 83.000 [TJ], en la Figura 9, se representa gráficamente los distintos tipos de combustibles con sus respectivos porcentajes de consumo [3].

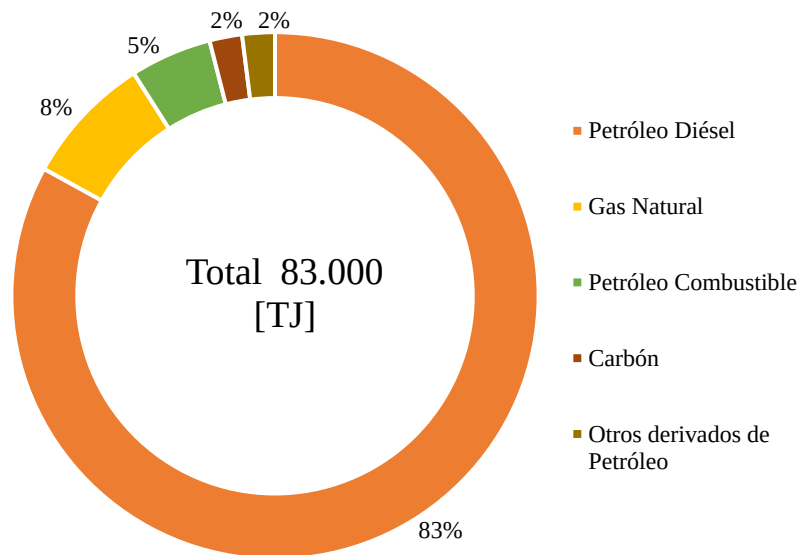


Figura 9: Consumo de energía de los combustibles en la industria minera. [3].

2.3.2.2 Consumo de Electricidad

El consumo de electricidad es el complemento del consumo de energía proveniente de orígenes fósiles en el rubro minero, ocupando un valor cercano al 53.3%, totalizando cerca de 94.000 [TJ] [3].

Como se aprecia en la Figura 10, es de diferenciar el proceso de concentración con un 57% respectivamente del consumo total de energía eléctrica en la industria [22]. Se demuestra además en la siguiente figura el consumo de energía eléctrica por proceso en la minería chilena.

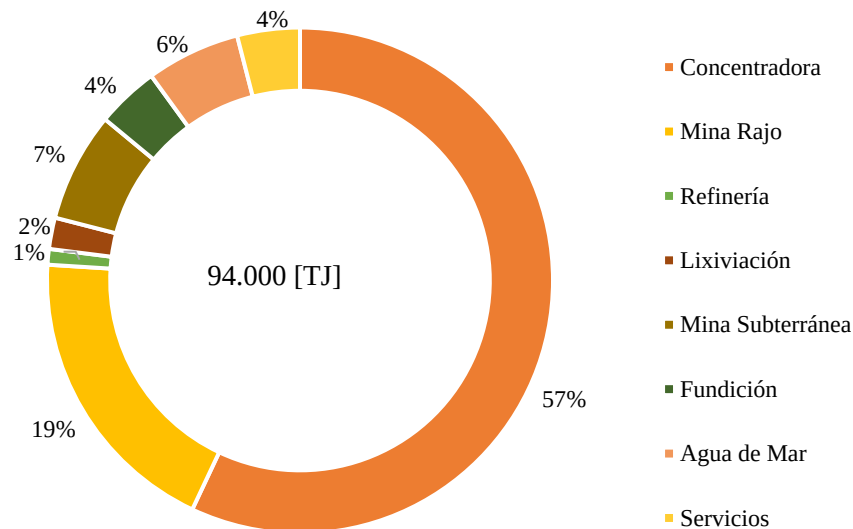


Figura 10: Consumo de energía eléctrica en la industria minera [3].

2.3.3 Operaciones Unitarias en Minería a Cielo Abierto

La operación mina en general puede ser separada en operaciones unitarias independientes realizadas generalmente en secuencia, y que permiten tanto la explotación como el desarrollo de una obra minera. La definición clásica considera como operaciones unitarias en minería a cielo abierto perforación y tronadura, carguío y transporte. Alternativamente, se incluye el Chancado Primario y Molienda según la filosofía operacional de cada empresa [23]. Cada una de estas se diferencia de la otra en función de la tarea que cumple en la cadena productiva, por los equipos que se utilizan y los insumos utilizados para su desarrollo.

2.3.3.1 Extracción

En este proceso es donde se retira el material desde el macizo que forma el yacimiento. Se pueden describir principalmente cuatro procesos:

- Perforación:

Una vez que ya se defina la zona a explotar y a través de la utilización de una perforadora, se perforara la roca y se depositara el material explosivo en la cavidad respectiva.

- Tronadura:

Siendo el proceso durante el cual se detonan los explosivos depositados en la operación anterior y se logra separar el material a extraer del resto del macizo rocoso, dejándolo dispuesto para el trabajo posterior.

- Carguío:

Una vez dinamitado el material es sacado de la zona de explotación utilizando una pala y cargando un sistema de transporte, el cual generalmente en minería a cielo abierto se trata de camiones de gran envergadura.

- Transporte:

Una vez cargados los camiones deben transportar el mineral respectivo según su función, ya sea para ser procesado como mineral comercial o acoplado como mineral estéril.

2.3.3.2 Chancado

El Chancado tiene como objetivo reducir tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en chancadores, los cuales pueden ser giratorios, de mandíbulas o de conos. Existen tres tipos de chancados dependiendo del tamaño de roca que admite y el tamaño de roca que resulta de este proceso: chancado primario, secundario y terciario. El objetivo del chancado en etapas es evitar consumos exagerados de energía, disminuir la presencia de material muy fino en el producto y evitar la ocurrencia de fallas mecánicas en las maquinas chancadoras debido a los fuerte esfuerzos que se producen por la aplicación de cargas muy intensas.

2.3.3.3 Molienda

Este proceso se realiza para disminuir el tamaño y homogeneidad del material procesado. Los equipos disponibles para realizar este proceso provienen principalmente de tres alternativas tecnológicas: molino de bolas, de barras y molino SAG.

Estas operaciones se pueden englobar en un solo esquema de operación mina, en la Figura 11, se distinguen las distintas operaciones unitarias como también se segmenta por color el área respectiva de cada conjunto de operaciones.

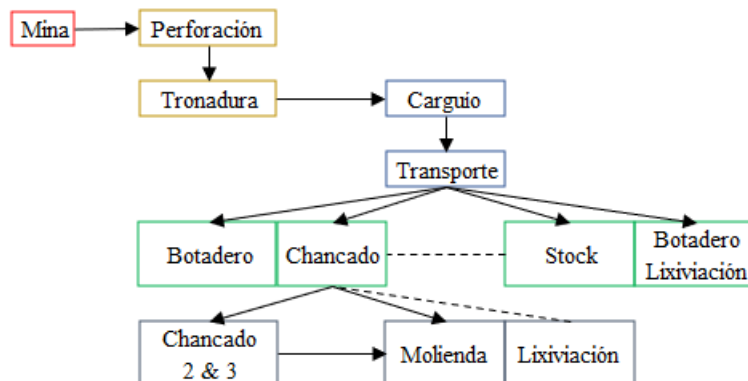


Figura 11: Esquema general de operaciones unitarias mina.

La Figura 12, muestra una distribución de los costos de las diferentes operaciones mina respecto a las actividades que las originan.

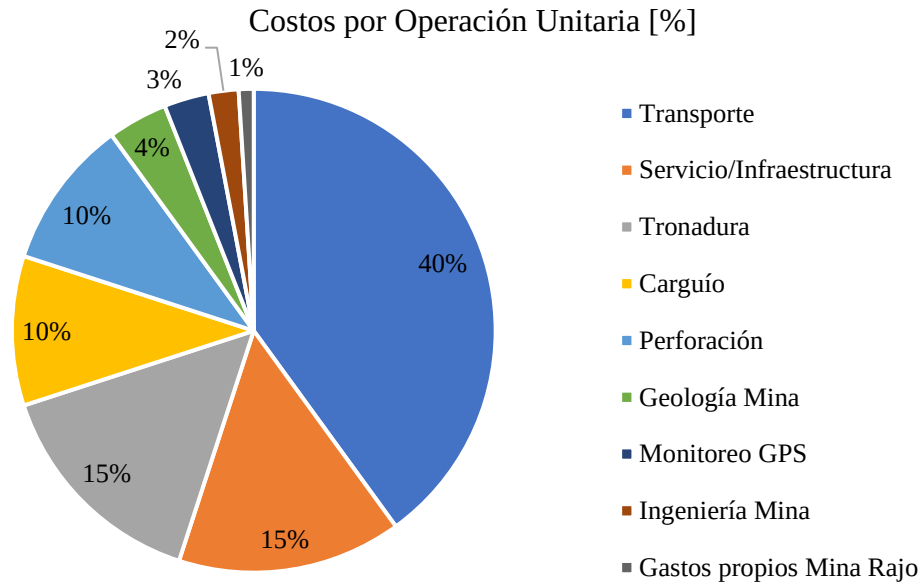


Figura 12: Distribución porcentual de costos de operaciones unitarias mina [23].

Además, esta tabla se puede extrapolar a una distribución de costos respecto a la procedencia o naturaleza de las operaciones mina, esto queda representado en la Figura 13.

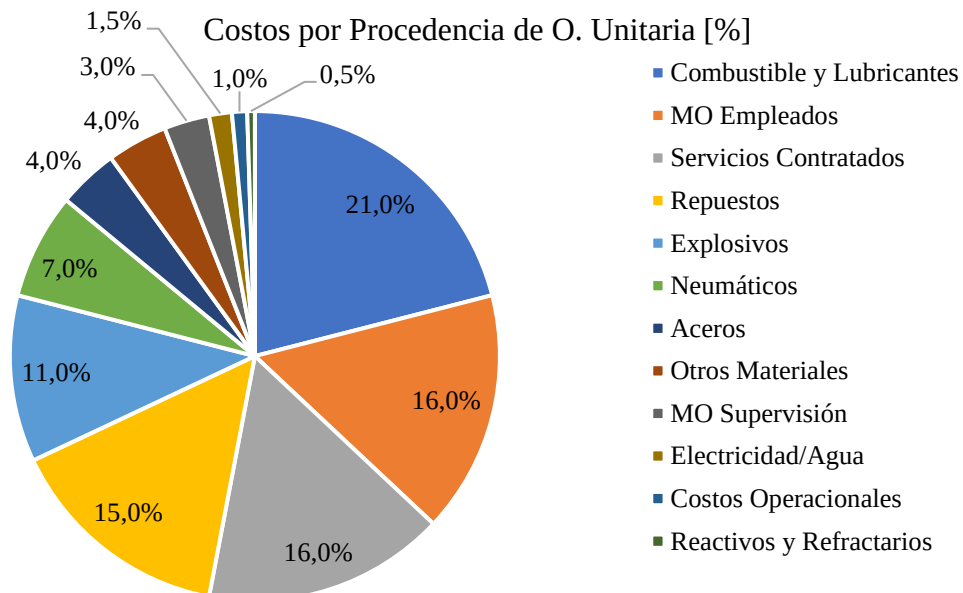


Figura 13: Distribución porcentual de costos en el origen de operaciones unitarias mina [23].

3. Hidrógeno Verde

3.1 Descripción General

A diferencia de muchos otros elementos, el hidrógeno no existe en su estado elemental o también denominado en la forma de elemento libre, es por esto por lo que debe ocurrir un proceso de separación de la materia prima a utilizar, que contenga hidrógeno. Esta separación permite diferenciar entre distintos tipos de hidrógeno.

En primer lugar, se tiene el Hidrógeno Gris, el cual es el método utilizado mayoritariamente hoy en día. Es denominado gris debido a que como materia prima utiliza gas natural y como impulsor de energía en el proceso de obtención de la molécula de hidrógeno [H₂]. Se utilizan combustibles fósiles, emitiendo gases de efecto invernadero en especial dióxido de carbono [CO₂] hacia la atmosfera sin un control predeterminado.

En segundo lugar, se encuentra el Hidrógeno Azul. El Hidrógeno Azul sigue la misma línea productiva del hidrógeno gris mencionada anteriormente, sin embargo, difiere en que gran parte del CO₂ emitido en el proceso de generación de energía es captado y utilizado en posteriores procesos [24].

Finalmente, el Hidrógeno Verde en tanto utiliza como materia prima el agua [H₂O]. Una vez separados los componentes del agua a través de un electrolizador el cual es potenciado por una energía renovable o “verde”, como por ejemplo Energía Solar se obtiene el hidrógeno dejando como emisión solamente oxígeno.

En la Tabla 3, se puede evidenciar las diferencias en su proceso de producción, su inversión debida para poder producir el tipo respectivo de hidrógeno, si este se encuentra de alguna manera ligado con la industria eléctrica y las emisiones de dióxido de carbono [CO₂] en cada proceso.

Tabla 3: Tabla comparativa en procesos de producción de hidrógeno [H₂] [24].

	H ₂ Gris	H ₂ Azul	H ₂ Verde
Proceso de Producción	Separar gas natural en H ₂ y CO ₂	Igual que H ₂ , pero captura el CO ₂ y potencialmente se utiliza	Separa agua en H ₂ y CO ₂ en un electrolizador potenciado por energías renovables
Inversión y Complejidad	Gran Escala con al menos 3 - 5 años de inversión	Gran Escala con al menos 5-10+ años de inversión, condicionado a capacidad de almacenamiento de CO ₂	Pequeña Escala, facultades parecidas a una batería. 1-3 años de inversión.
Conexión con rubro energético	No	No	Si
Emisión de CO ₂ [Kg de CO ₂ por Kg de H ₂ producido]	~ 10	~ 1-3	~ 0

3.2 Formas de producción a nivel nacional

Como se menciona en los apartados anteriores para obtener el elemento libre de hidrógeno debe ocurrir un proceso de separación de partículas debido a que no se puede encontrar como elemento libre en estado natural. Este proceso tiene como materia prima el agua para el caso particular del hidrógeno verde además de que la energía suministrada al sistema de separación es una energía renovable.

Se puede apreciar en la Tabla 4, la distribución de potencia en Mega Watts, de cada tipo de energía renovable en la mayoría de las regiones de Chile. La siguiente tabla permite dimensionar cuantitativamente la potencia nacional en el rubro [25].

Tabla 4: Distribución de energías renovables por región en Chile [25].

	Potencia Solar Concentrada [MW]	Potencia Solar Fotovoltaica [MW]	Potencia Eólica [MW]	Potencia Hidroeléctrica [MW]	Total [MW]	Leyenda [MW]	
Arica y Parinacota	5.584,5	37.373,5	-	-	42.958,0	0 - 150	
Tarapacá	136.881,9	167.300,1	-	-	304.182,0	150 - 800	
Antofagasta	412.341,1	876.224,9	-	-	1.288.566,0	800 - 1.200	
Atacama	22.552,0	165.381,0	-	-	187.933,0	1.200 - 2.000	
Coquimbo	-	3.216,4	1.189,6	-	4.406,0	2.000 - 3.000	
Valparaíso	-	62,2	-	102,8	165,0	3.000 - 3.200	
Metropolitana	-	-	-	840,0	840,0	3.200 - 4.800	
O'Higgins	-	-	119,7	678,3	798,0	4.800 - 6.600	
Biobío	-	-	5.054,2	3.097,8	8.152,0	6.600 - 16.500	
Araucanía	-	-	2.626,5	1.542,5	4.169,0	16.500 - 40.400	
Los Ríos	-	-	3.203,9	2.320,1	5.524,0	40.400 - 118.200	
Los Lagos	-	-	13.618,2	1.346,9	14.965,0	118.200 - 180.000	
Aysén	-	-	40.378,2	3.144,4	43.522,6	180.000 - 260.000	
Magallanes	-	-	228.809,7	1.927,2	230.736,9	260.000 - 960.000	
						960.000 - 1.288.566	

3.2.1 Hidrógeno Verde proveniente de Energía Solar

En Chile la opción potencialmente más viable es la energía solar, sobre todo en el territorio norte del país, debido a su amplitud de terreno con radiaciones superlativas en comparación al resto del terreno nacional e incluso mundial [26]. Esta energía es captada por los distintos métodos de producción de energía solar como paneles fotovoltaicos, heliostatos o colectores solares que canalizaran esta energía para ser empleada en el proceso de producción de hidrógeno.

Llevando esta idea a su implementación en la minería a cielo abierto en Chile, es un factor que se ve con optimismo, debido a que gran parte de la minería a cielo abierto se ubica en las regiones con mayor potencial de producción de este tipo de energía como se especifica en la Tabla 4, la región de Antofagasta es la región con mayor potencial energético como total y canalizado como energía solar, esto presenta una facilidad a la hora de su implementación en materia de transporte como almacenamiento debido a la cercanía hacia la minería a cielo abierto que también se basa principalmente en esta región, la cual alberga cerca de 54% de la minería del cobre a nivel nacional [21].

3.2.2 Hidrógeno Verde proveniente de Energía Eólica

Basado en la premisa del hidrógeno verde, la energía debe provenir de una fuente renovable o verde. En Chile, luego de la energía solar, la energía eólica es un fuerte nacional debido a los vientos favorables en el centro sur del territorio nacional. Esto se puede apreciar de manera clara en la Tabla 6, donde queda demostrado que las regiones de Aysén y Magallanes presentan un potencial tremendo en cuanto a la producción de energía eólica.

Si bien existe una oportunidad clara en cuanto a la producción de hidrógeno verde en la zona centro sur del país, aparecen distintas barreras como transporte y almacenamiento las cuales no se presentan en las regiones al norte del país. Esto en gran parte debido a las grandes planicies que se encuentran en el norte y el amplio territorio llano que permite la elaboración de industrias y poca pendiente a la hora del transporte, además de una baja considerable en la densidad poblacional alterando de menor manera los ciclos industriales que funcionan actualmente.

3.3 Demanda actual del hidrógeno

Actualmente Chile se encuentra inmerso en una acción climática constante de manera decidida y ambiciosa, esto gracias a su compromiso de ser en el año 2050 un país carbono – neutral [2]. Dicho esto, se debe considerar como el uso del hidrogeno debe evolucionar en su fabricación además de su potenciamiento en la sustitución de energías no renovables, siendo que, en varios países desarrollados, tales como Australia, Alemania, España, Francia, Portugal entre otros ya existe una estrategia nacional disponible para desarrollar este elemento de manera sustentable [27]. La demanda global hoy de energía suministrada con hidrógeno bordea los 3 [PWh], y tiene proyecciones claras de cambiar además de agrandar el abanico de sus usos hasta llegar incluso a los 22 [PWh] [26]. Como se muestra en la Figura 14, esto se debe principalmente a lo ya mencionado anteriormente en materia de descarbonizar no solamente la matriz eléctrica del mundo si no la matriz energética total.

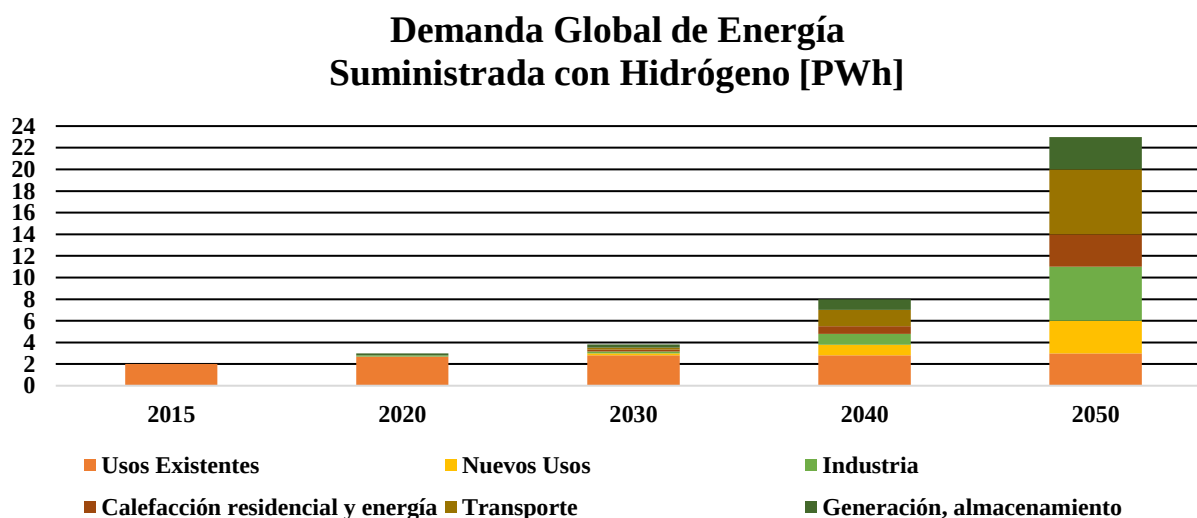


Figura 14: Representación gráfica de demanda global de energía proveniente del hidrógeno verde [26].

3.3.1 Proyecciones

Chile se posiciona como un líder en cuanto a las energías limpias, debido principalmente a su amplio terreno hábil para la fabricación de estas, las que se explican a continuación:

- En el norte de Chile se encuentra la radiación solar más alta del planeta, donde se alcanzan factores de incluso 35% plantas fotovoltaicas.
- Generación solar en la zona central es más competitiva que la generación eléctrica con energía fósil.
- Los vientos del extremo austral soplan con la misma energía en tierra que en mar adentro, traduciéndose en factores de planta sobre 60% en tierra.

Esto también debe sumarse a que Chile producirá el hidrógeno verde más competitivo del planeta, debido a los bajos costos en de electrolizadores y de generación renovable, con un crecimiento notorio por parte de privados en el financiamiento verde. Todo esto se traduce en el hidrógeno verde con el costo nivelado (sin considerar costos de compresión, transporte y distribución, los que varían según su aplicación) más bajo del mundo al año 2030 [26] como se puede apreciar en la Figura 15, generando una producción competitiva a gran escala.

Costo nivelado de Hidrógeno Verde [USD/kg H₂]
Para el año 2030

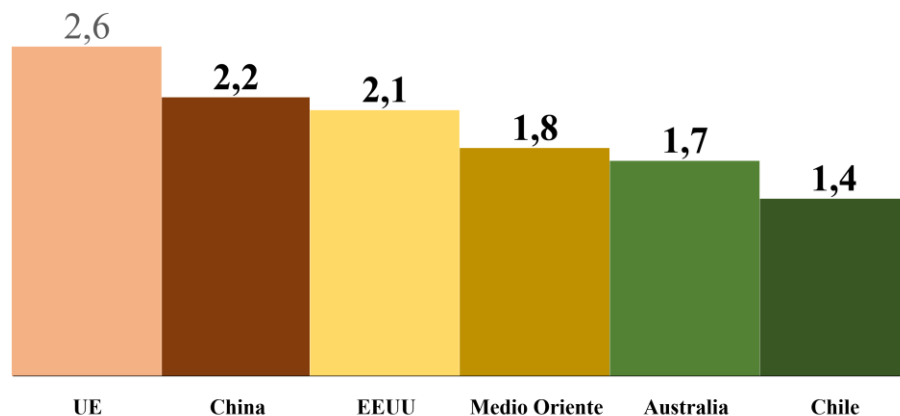


Figura 15: Costos de producción de hidrógeno verde para el año 2030 [26].

Esto no solamente marca el inicio de un mercado chileno como potencia mundial sino también un nuevo mercado en el país que se podrá incluso comparar con el tamaño de la minería, en la Figura 16 se expresa el crecimiento del mercado a nivel nacional desde el año 2025 hasta el 2050.

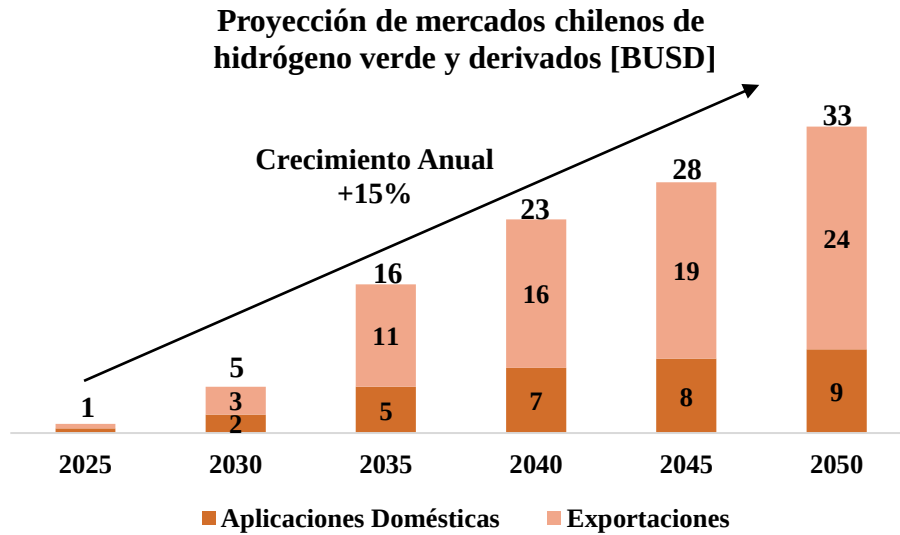


Figura 16: Proyecciones de mercados chilenos de hidrógeno y derivados desde el año 2025 hasta el año 2050 en [BUSD] [26].

3.4 Infraestructura de reabastecimiento

Para la correcta aplicación de este tipo de energía como complemento o suplemento de los combustibles usados actualmente se debe contar con la infraestructura capaz de suplir la demanda energética a la cual se desea trabajar.

3.4.1 Tipo de estaciones

En la actualidad es posible diferenciar dos tipos de estaciones, esto según el tipo de suministro de combustible verde que posean las mismas. Basadas en la producción propia o desde una provisión exterior proveniente de otro lugar [28].

En primera instancia se encuentran las plantas *on – site* las cuales producen en el lugar el hidrógeno respectivamente y las de tipo *off – site* las cuales son suministradas desde productora externa, requiriendo así un proceso de traslado adicional.

3.4.2 Módulos de suministro

Previo al suministro de hidrógeno en cualquier tipo de estanque este debe pasar por cinco etapas, las que constituyen el proceso de carguío de hidrógeno, las cuales se detallan en la Figura 17. Este proceso se basa en las propiedades del hidrógeno como elemento [29].



Figura 17: Proceso de módulos de suministro.

3.4.2.1 Suministro en estaciones on-site

Cuando la materia prima es agua se utiliza la electrólisis como proceso de separación para conseguir el elemento libre de hidrógeno como se ha mencionado en apartados anteriores. La electricidad suministrada hacia el electrolizador proviene desde una fuente renovable. Este tipo de planta es escaso a nivel nacional como mundial.

3.4.2.2 Suministro en estaciones off-site

Esta suministración es basada según la distancia desde el proceso de obtención de la molécula de hidrógeno hasta la planta de suministro de este.

- Distribución

Es así como este se puede transportar ya sea mediante tuberías, contenedores o remolques tubulares. El transporte de hidrógeno al igual que los demás combustibles se puede transportar tanto en formato líquido como gaseoso.

- Hidrógeno líquido

Para realizar el transporte en estado líquido se requiere de dos procesos externos que mantengan este componente a una temperatura cercana de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ [29], a presión ambiental, y luego un segundo proceso de vaporización de este en caso de que su utilización sea en estado gaseoso. Es por esto por lo que los camiones de transporte con estanques criogénicos son la única opción realmente viable para este tipo de transporte.

El beneficio que presenta el transporte bajo este método es la cantidad de hidrógeno que se puede transportar en comparación, trasladando cerca de $70.8\text{ [kg H}_2\text{]}$ por cada $\text{[m}^3\text{]}$ [29].

- Hidrógeno gaseoso

En estado gaseoso el hidrógeno permite un transporte un tanto más amigable debido a que se puede transportar tanto en remolques tubulares, depósitos cilíndricos como tuberías, al igual que los combustibles gaseosos utilizados de manera cotidiana, estas opciones son estudiadas según la distancia de transporte del elemento.

El elemento de control se vuelve determinante a la hora de transportar el hidrógeno en estado gaseoso, esto debido a su poco equilibrio como elemento, esto será exployado con mayor detalle a lo largo del presente ensayo.

- **Compresión**

Esta etapa del modelo cumple la función de elevar la presión del elemento, esto es independiente del tipo de suministro, esto optimiza el abastecimiento a los motores en cuestión. El hidrógeno se debe impulsar para poder ser traspasado a un nuevo recipiente de almacenaje, es por eso por lo que esta etapa es fundamental entre el proceso de suministro y almacenamiento.

Esta unidad es la que presenta la mayor cantidad de fallas, por lo que es altamente recomendado un proceso de control exhaustivo para el proceso [29].

- **Almacenamiento**

El almacenamiento del hidrógeno es diferido según el estado en el que se quiera resguardar el mismo, para el caso del hidrógeno en estado líquido se requieren compartimientos que permitan mantener las temperaturas mencionadas anteriormente, en cambio, para almacenar el elemento en estado gaseoso se deben tener materiales que aguanten la presión de este. Es por esto por lo que el almacenamiento se convierte en posiblemente la mayor dificultad del proceso de implementación del hidrógeno en la minería.

- **Acondicionamiento**

La normativa SAEJ2601 establece que la temperatura permitida para el combustible al momento de pasar de su respectivo almacenamiento a través del dispensador hacia el tanque de cualquier motor o vehículo debe ser a los 85 [°C] [29], sin embargo, para el caso particular del hidrogeno es más complejo que con otros tipos de combustibles, esto debido a que este eleva su temperatura de manera espontánea y a rangos muy altos una vez comienza a fluir, es por esto que las unidades de acondicionamiento se encargan de mantener la temperatura del elemento cercano a los - 40 [°C] y así no sobrepasar los límites fijados por norma [29].

- **Dispensación**

Este módulo del proceso de suministro de hidrógeno es basado en el surtidor o dispensador de la planta, este es el dispositivo que permite la libre circulación desde el almacenamiento a cualquier motor en cuestión, este dispositivo deberá contar con lo necesario para adaptarse según los requerimientos del motor al cual surtirá [29].

3.5 Hidrógeno como combustible

El hidrógeno verde surge como una buena opción para la remoción de los combustibles fósiles por variados argumentos, dentro de los cuales los principales son los bajos costos de producción en territorio nacional, la capacidad energética que posee este elemento y como principal factor las emisiones generadas por el mismo. En los siguientes apartados se abarcará con mayor detalle cada uno de estos argumentos.

3.5.1 Comparación energética con combustibles fósiles

Una de las principales cualidades que posee el hidrógeno en su implementación como combustible es su capacidad energética, la cual en sus facetas líquida y gaseosa sobrepasa con creces a los combustibles utilizados contemporáneamente. Si es comparado con la gasolina, combustible más utilizado a nivel nacional, se traduce en cerca de tres veces la energía almacenada que proporciona un kilogramo de hidrógeno en símil a un kilogramo de gasolina [30]. En la Figura 18 se puede ver la comparación energética del hidrógeno en sus facetas gaseosas como líquidas, con un conjunto de combustibles utilizados de manera recurrente en las distintas industrias nacionales.

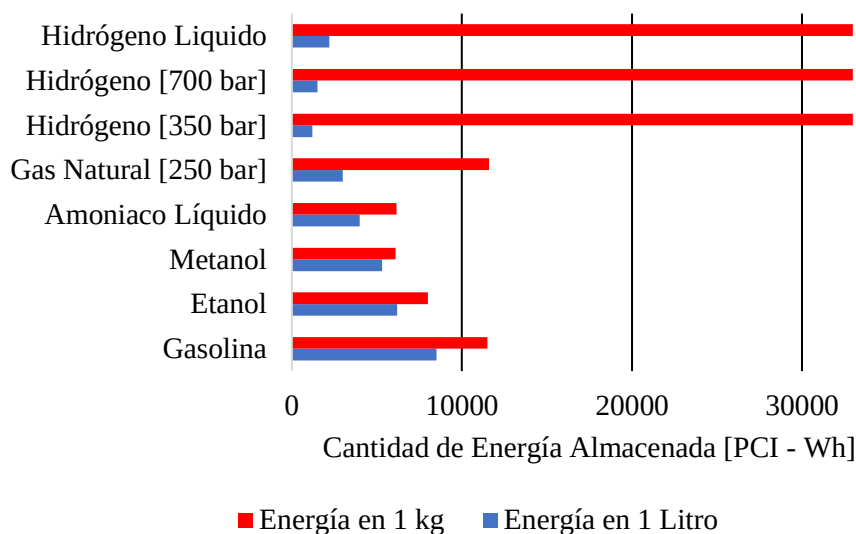


Figura 18: Energía contenida en distintos combustibles por cada unidad de kilo y litro [30].

3.5.2 Comparación económica con combustibles fósiles

La principal diferencia que se evidencia entre el hidrógeno verde y los combustibles es la producción en suelo nacional de la presente energía renovable, en comparación a los costos directos de la importación en materia de combustibles en todas sus variantes. Es importante recordar que el presente estudio se basa en proyecciones de producción de esta energía renovable.

Gracias al potencial de producir este elemento en territorio nacional y en particular en la zona norte, que es donde se encuentra concentrada la minería a cielo abierto, los costos de producción y transporte son extremadamente bajos en comparación con cualquier tipo de combustible. De acuerdo con Asociación Chilena de Hidrógeno Verde y el [30]Ministerio de Minería y Energía, en el plan nacional estipulado para el hidrógeno verde, se estima que para las primeras cuatro regiones nacionales los valores de producción de hidrógeno verde son cercanos a 1.5 [USD/kg H₂] incluso llegando bajo estos valores para las primeras dos regiones, en cambio, las regiones de Valparaíso y Metropolitana el valor redondea entre 1.5 – 1.6 [USD/kg H₂] [31]. esto en comparación con el valor comercial del combustible que ronda cerca de los 0.6 [US\$/Litro] [32] [33].

Esto sin duda es una disminución importante en los costos fijo de la industria de la minería a cielo donde por camión promedio se utilizan cerca de 3.600 litros de combustible diario [31].

3.5.3 Comparación de emisiones con combustibles fósiles

Es sin duda la razón más importante a la hora de considerar el hidrógeno como combustible alternativo a los combustibles fósiles actuales. Los residuos del hidrógeno verde como combustible son solamente agua tanto en estado gaseoso como líquido [30], si a esto se le suma el factor que la producción de este es un proceso energizado con energías renovables significa que en todo su ciclo de vida las emisiones son prácticamente nulas, en comparación con los combustibles fósiles.

3.6 Dificultades de implementación

La principal dificultad para el uso de hidrógeno es el almacenamiento, esto debido a que en su formato gaseoso puede llegar a ocupar incluso 3.000 veces más espacio que un gas con las mismas capacidades energéticas a una presión y temperatura ambiente, es por esto por lo que es necesario utilizar el hidrógeno en compresión, licuefacción y otros métodos para para sistemas estacionarios, vehículos y aplicaciones móviles [31]. En la Figura 19 se representa la cantidad de energía almacenada en un determinado sistema por unidad de volumen, en diferentes estados físicos de variados combustibles en comparación con el hidrógeno.

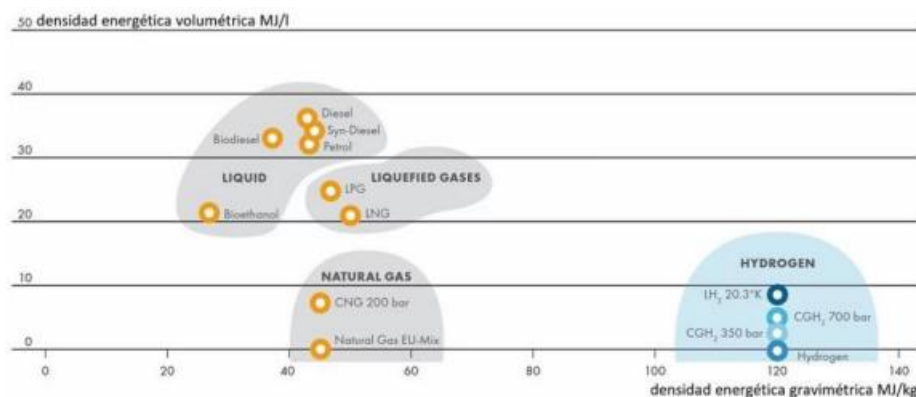


Figura 19: Representación gráfica de los volúmenes utilizados por combustibles en diferentes estados físicos [31].

Esto se debe sumar a otros factores como grandes altitudes, lo que se traduce en una menor presión atmosférica y menor cantidad de oxígeno, ambos factores afectando de manera directa al rendimiento y comportamiento del elemento. La presencia de polvo, lo que implica directamente un mayor mantenimiento de la infraestructura dedicada al hidrógeno verde. Las temperaturas extremas en zonas desérticas que son muy altas a lo largo del día y bajas por las noches.

4. Metodología

En función de los objetivos propuestos en el presente estudio, se desarrolla la siguiente metodología, tomando en cuenta la sucesión de etapas representadas en la siguiente Figura.

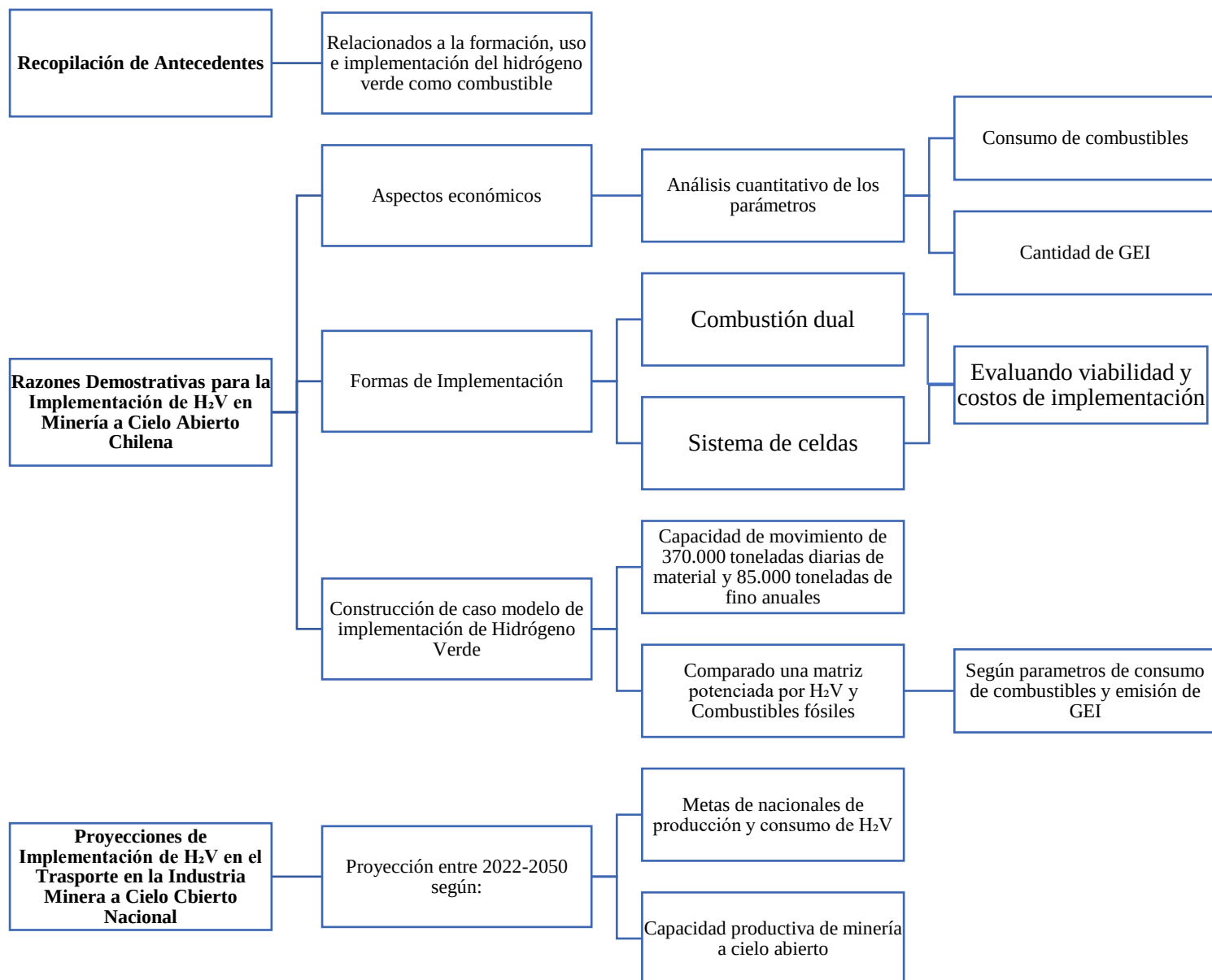


Figura 20: Diagrama de metodología a implementar en el presente estudio.

A continuación, se describe cada una de las etapas respectivas de la metodología.

- **Antecedentes:** Se desarrolla una revisión del estado actual de la minería a cielo abierto, en cuanto a su consumo de energía como de emisiones de gases invernadero. A su vez, se hace un estudio de las nuevas tecnologías en materia de hidrógeno verde y sus posibles aplicaciones en la industria minera, lo cual será asociado con la ruta estratégica del gobierno nacional en cuanto al desarrollo de estas nuevas energías.
- **Parámetros y criterios de evaluación:** Se realizará un análisis cuantitativo en términos de los parámetros y criterios de evaluación, los cuales son los costos de consumo de combustible para una matriz potenciada por combustibles fósiles y por hidrógeno verde, además de la cantidad de emisiones de GEI para los respectivos casos, siendo estos parámetros cruciales en la implementación del hidrógeno verde para la industria minera.
- **Alternativas de desarrollo:** Se caracterizarán detalladamente, las diferentes alternativas de tecnologías de hidrógeno verde compatibles con el uso en la minería a cielo abierto, comparando la viabilidad técnica y costos de implementación, calculando los parámetros y criterios de desarrollo de las diferentes alternativas. Sumado a lo anterior, se ahondará en un estudio de las distintas viabilidades de su implementación en el tiempo, con el fin de obtener una noción temporal de su ejecución.
- **Cálculo de aspectos económicos:** Se calculan los principales aspectos económicos de los parámetros de consumo de combustible y cantidad de emisiones asociadas a las alternativas de implementación y escenarios a evaluar. Lo anterior, realizando un estudio cuantitativo relacionado al costo de producción para el hidrógeno verde y costo de compra en el caso de los combustibles fósiles, hasta su implementación en ambos casos y todo lo que conlleva realizar estos procesos, obteniendo así los parámetros financieros respectivos para cada origen energético.
- **Construcción de caso base en torno a la minería a cielo abierto:** Se confeccionará un caso base, el cual consiste en una mina ficticia con parámetros de consumo de combustible y emisiones de GEI basado en la gran minería a cielo abierto en Chile. El caso base será detallado en el capítulo 5. De esto, se desprende el objetivo de lograr una comparación con parámetros actuales de 5 escenarios de flota que abastecerán la faena, en los cuales el uso del hidrógeno verde será insertado paulatinamente en proporciones de 10%, 25%, 50% y 100% en la operación de transporte, mutando desde un primer escenario potenciado completamente por combustibles fósiles a un escenario abastecido completamente por hidrógeno verde. Este caso se presenta como un argumento aplicado a la minería cielo abierto chilena, con el fin de corroborar el uso del hidrógeno verde con parámetros contemporáneos de la propia industria, utilizando también los argumentos mencionados anteriormente.
- **Proyecciones de la implementación en el transporte en la industria minera de cielo abierto en Chile:** En base a lo anterior, se realiza una proyección de la implementación del H₂V en la industria, identificando los desafíos estratégicos para su desarrollo. Esta proyección, se realizará en torno a la capacidad de producción a nivel nacional de cobre fino entre los años 2022 y 2050. A su vez, basándose también en los criterios de costos de consumo de

combustibles y cantidad de emisiones, con el propósito lograr la meta a nivel nacional de carbono neutralidad, proceso que busca desplazar íntegramente las emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050 y cómo el hidrógeno verde puede ayudar a cumplir esta misma, comparándose con el escenario actual de tecnologías empleadas en la minería.

5. Razones Demostrativas para la Implementación de Hidrógeno Verde en Minería Cielo Abierto Chilena

En el presente apartado se extenderán con mayor detalle los apartados expuestos en el capítulo de metodología.

5.1 Parámetros y Criterios de Evaluación

Para poder realizar el análisis cuantitativo se escogen dos parámetros a compararse, los cuales son los costos del consumo de combustibles y la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero para la totalidad de la flota de equipos para cada escenario respectivamente.

He de recordar que el presente estudio se encuentra basado en la operación unitaria de transporte por lo tanto el análisis a llevarse a cabo es respecto a la flota de camiones de alto tonelaje a utilizarse en cada escenario.

5.2 Cálculo de Aspectos Económicos

Como se mencionó anteriormente y como se realizará para los respectivos escenario, el consumo de combustible se obtiene de la premisa que cada camión de alta capacidad de carga tiene un consumo cercano a los 3.600 litros de combustible para un movimiento mina de 370.000 toneladas diarios, este rango promedio y su comparación con el movimiento mina para cada mes respectivamente entregara el valor de consumo en cada escenario para la totalidad de la flota en un año calendario, de igual manera se calcularan las respectivas emisiones. En cuanto al consumo de Hidrógeno Verde, su costo será calculado basándose en el consumo de 1 tonelada diaria por cada camión [30] también para un año calendario.

Esto permite tener un cálculo de los aspectos económicos con mayor certeza debido a que entrega el consumo total específico para la mina modelo generada respectivamente.

A continuación, se formarán el caso base y sus escenarios a compararse, los cuales comienzan con una flota potenciada completamente por combustibles fósiles, hasta llegar a una flota potenciada completamente por hidrógeno verde. Esto para incluir un argumento aplicado fundado en el sector minero, en cuanto a los cambios potenciales que puede generar la implementación del hidrógeno verde en una faena modelo.

5.3 Creación de Caso Base

Para efecto de este estudio se formará un caso base modelo del sistema de minería a cielo abierto y su operación unitaria de transporte mina, tal que permita una comparación cuantitativa tanto entre costos de operación como emisiones de dióxido de carbono basada en un caso aplicado en la minería a cielo abierto nacional.

Para este caso se debe aclarar que la minería en Chile se puede subdividir en tres magnitudes, pequeña, mediana y gran minería. Este caso será comparado en la magnitud de gran minería. Esto significa una faena minera tipo con un movimiento total de material de 370 mil toneladas diarias, lo que se traduce en cerca de 85.000 toneladas de cobre fino al año. Asimilándose en capacidad productiva a faenas como Los Bronces, Spence, Cerro Colorado, entre otras actualmente operando en Chile [32].

5.3.1 Producción

En consideración con lo anterior, las condiciones generales se basan, específicamente en una mina de pórfidos de cobre donde el proceso de extracción es basado en el proceso de extracción a cielo abierto convencional con un movimiento diario de material de 370 mil toneladas, traducido en 85 mil toneladas anuales de fino. Este movimiento mina se ve resumido en la siguiente Tabla por mes, en tanto movimiento total como razón estéril mineral (REM) [32].

Tabla 5: Movimiento Mina estipulado por mes y razón estéril mineral (REM).

Mes	Movimiento Mina [Mt]	REM [Mt]
Enero	11.0	2.6
Febrero	10.3	2.2
Marzo	11.3	2.1
Abril	11.2	1.9
Mayo	11.3	1.7
Junio	10.9	2.1
Julio	11.2	1.9
Agosto	11.0	1.7
Septiembre	10.8	1.6
Octubre	11.8	1.8
Noviembre	11.4	1.8
Diciembre	12.3	1.8
Promedio	11.2	1.9
Total	134.5	

5.3.2 Flota de Equipos

Para la totalidad de mineral que se moverá diariamente, se necesita una flota capaz de cubrir dicha cantidad, es por esto por lo que se consideran 50 camiones con una capacidad de 300 toneladas por unidad. Además, he de considerar que cada camión tiene una capacidad de estanque de 370 litros, traducido a mil galones de combustible.

Se consideran además las siguientes características propias de los equipos [32], con el fin de reducir el margen de error en los respectivos cálculos posteriores, entregando un rendimiento equitativo y cumpliendo con el mismo ciclo de desgaste para toda la flota:

- 22 [Km/h] de velocidad promedio
- Se cumple la capacidad de carga en todo momento

- 1.800 [KW] de potencia
- Consumo de Combustible es alrededor de 3.600 [Litros/día]

En la siguiente Tabla se muestra la composición de cada caso, en cuanto a la cantidad y tipos de camiones respectivos para cada uno.

Tabla 6: Cantidad y tipo de camiones en cada escenario respectivo de comparación.

	Escenario 1 – E0%	Escenario 2 – E10%	Escenario 3 – E25%	Escenario 4 – E50%	Escenario 5 – E100%
Cantidad Total de Camiones	50	50	50	50	50
Potenciados con Combustible Diésel	50	45	37	25	0
Potenciados con Hidrógeno Verde	0	5	13	25	50
% Flota potenciados con H2V	0%	10%	25%	50%	100%

Cada uno de estos casos hace referencia a una totalidad de utilización de hidrógeno verde en la flota de 0%, 10%, 25%, 50% y 100% respectivamente.

5.3.3 Costos de implementación y utilización

Para poder realizar un análisis cuantitativo en términos de costos, se utilizarán los siguientes costos con una variabilidad de 20 % esto con el fin de generar una sensibilidad en la misma:

- 1.5 [USD/ Kg H₂] para hidrógeno verde [25] [30].
- 0.6 [USD/ Litro] para combustibles [32].

Por lo tanto, se utilizarán valores que varían entre 1.2 – 1.8 [USD/ Kg H₂] para el Hidrógeno Verde y en cuanto para el combustible se utilizará un rango de 0.48 – 0.72 [USD/ Litro] para combustibles.

A continuación, se detallará la formación de los cinco escenarios y su composición, además del análisis económico del costo en el consumo de combustibles y también la cantidad de emisiones de dióxido de carbono de la flota respectiva para cada caso.

5.4 Escenario 1 (E0%)

Como se ha mencionado anteriormente, este estudio se basará en cinco casos los cuales serán comparados para generar conclusiones sobre la implementación de las nuevas tecnologías del Hidrógeno verde en la minería a cielo abierto. Dicho esto, el primer caso, será basado en las condiciones contemporáneas de consumo energético en la industria en un año calendario, estas serán explicadas a continuación.

5.4.1 Emisiones

Para los camiones tipo escogidos, que poseen una capacidad a ras de 300 toneladas y una potencia que ronda los 2.000 [kW], se puede concluir que, en un día con condiciones de uso normales, es decir sin fallas ni detenciones no programadas, el consumo de combustible es cercano a los 3.600 [l/día] [31] esto se asociara a la cantidad de material removido al mes como se puede apreciar en la Tabla 7. Esta cantidad de combustible y potencia para los CAEX actuales se traduce en un total de 5.000 toneladas anuales de CO₂ por camión, lo que para el total de la flota de equipos entrega un total de 250.000 toneladas anuales de CO₂ los cuales se van completamente a la atmósfera.

5.4.2 Costos

Los costos operacionales de cada camión serán medidos en cuanto a la cantidad de combustible consumido por el mismo.

Para este primer caso donde solo existe consumo de combustibles fósiles, el consumo total de la flota se traduce en cerca de 59 millones de litros de combustible anuales. Considerando que los valores expuestos anteriormente para el combustible y el hidrógeno, el costo total ronda entre 28.3 y 42.4 millones de dólares al año considerando la variación del 20% en el precio como se expuso anteriormente.

En la siguiente Tabla se aprecia el resumen de tanto costos como emisiones basadas en la cantidad de camiones según tipo y según consumo para el caso respectivo.

Tabla 7: Tabla resumen de consumo, costos totales y emisiones de primer escenario.

Primer Escenario		
Consumo de Combustible	59	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H ₂	0	[Ton H ₂ /Año]
Costo Diesel	35,3	[MU\$D/Año]
Costo H ₂	0,0	[MU\$D/Año]
Costo Total	35,3	[MU\$D/Año]
Emisiones	250000	[Ton CO ₂ /Año]

5.5 Escenario 2 (E10%)

Para el presente caso se tendrá solamente un 10% de la flota total de CAEX potenciados por hidrógeno verde, este caso representa una etapa potencialmente inicial a la hora de implementar el hidrógeno verde en faenas.

5.5.1 Emisiones

Si bien es solamente el diez por ciento de reducción de flota, se puede apreciar un cambio inmediato en la cantidad de dióxido de carbono emitido hacia la atmosfera, como resultado se obtiene un total de 225.000 toneladas de dióxido de carbono, reduciendo en 25.000 toneladas las emisiones iniciales.

5.5.2 Costos

Los costos también se ven afectados de manera directa, esto en gran parte al poco hidrógeno necesario a utilizarse en comparación con los combustibles y su bajo precio. En cuanto al consumo total de combustible se disminuye en un total de 6 millones de litros anuales, lo que se traduce en un ahorro en combustibles cercano a los 4 millones de dólares. A su vez, sumando el costo en hidrógeno y en combustibles para este caso, se obtiene un total de 34.5 millones de dólares anuales, los cuales pueden variar en el año según los precios de estos combustibles entre 41.4 y 27.6 millones de dólares. En la siguiente Tabla resumen se muestran explícitamente los valores obtenidos para el respectivo caso.

Tabla 8: Tabla resumen de consumo, costos totales y emisiones de segundo escenario.

Segundo Escenario		
Consumo de Combustible	53	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H ₂	1800	[Ton H ₂ /Año]
Costo Diesel	31,8	[MU\$D/Año]
Costo H ₂	2,7	[MU\$D/Año]
Costo Total	34,5	[MU\$D/Año]
Emisiones	225000	[Ton CO ₂ /Año]

5.6 Escenario 3 (E25%)

Para este tercer caso y con la intención de demostrar una transformación paulatina hacia una flota total de CAEX potenciados con hidrógeno verde, se tendrá un 25% del total de la flota utilizando este combustible. A su vez, el resto seguirá utilizando combustibles, es decir, se tendrá 13 camiones potenciados por H₂ y 37 potenciados a combustible.

5.6.1 Emisiones

Las emisiones comienzan a ser bastante significativas, este caso permite reducir los números desde 250 mil toneladas de dióxido de carbono anuales hasta un total de 185 mil toneladas.

5.6.2 Costos

Los costos también presentan una baja significativa, esto considerando la sensibilidad expresada anteriormente en los valores entrega un costo para esta flota de un total entre 26.5 – 39.8 millones de dólares anuales como inversión total. En la siguiente Tabla respectiva se muestra un resumen total del caso.

Tabla 9: Tabla resumen de consumo, costos totales y emisiones de tercer escenario.

Tercer Escenario		
Consumo de Combustible	44	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H ₂	4680	[Ton H ₂ /Año]
Costo Diesel	26,2	[MU\$D/Año]
Costo H ₂	7,0	[MU\$D/Año]
Costo Total	33,2	[MU\$D/Año]
Emisiones	185000	[Ton CO ₂ /Año]

5.7 Escenario 4 (E50%)

En el presente caso se considera una flota repartida equitativamente, esto quiere decir que estará compuesta por la misma cantidad de camiones potenciados con combustible verde y por combustibles fósiles.

5.7.1 Emisiones

La cantidad de dióxido de carbono expulsado hacia la atmosfera se reduce alrededor de un 50%, llegando a un total cercano de 125 mil toneladas de CO₂ emitidas como desecho.

5.7.2 Costos

Sin duda alguna los costos son bastante reducidos, esto gracias al valor del hidrógeno verde en comparación con los combustibles, en el presente caso el costo total ronda entre 24.9 – 37.4 millones de dólares anuales, reduciendo en cerca de 12% lo costos originales. En la siguiente Tabla se expresa un resumen del presente caso.

Tabla 10: Tabla resumen de consumo, costos totales y emisiones de cuarto escenario.

Cuarto Escenario		
Consumo de Combustible	29	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H ₂	9000	[Ton H ₂ /Año]

Costo Diesel	17,7	[MU\$D/Año]
Costo H ₂	13,5	[MU\$D/Año]
Costo Total	31,2	[MU\$D/Año]
Emisiones	125000	[Ton CO ₂ /Año]

5.8 Escenario 5 (E100%)

De manera progresiva se plantea llegar al presente caso el cual utiliza en totalidad al hidrogeno verde como fuente de energía, las tecnologías respectivas para esta utilización son explyadas en capítulos siguientes del presente estudio. La premisa de generar este caso es proponer un escenario optimo en cuanto a la utilización de las energías renovables en la industria, para demostrar su viabilidad tanto económica como en términos de sustentabilidad sobre la contaminación generada.

5.8.1 Emisiones

Para la flota seleccionada, el uso de un motor potenciado completamente por hidrógeno significa una reducción de la totalidad de emisiones, recordar que las emisiones emitidas por este elemento luego del proceso de generación de energía son solamente agua en estado líquido como gaseoso.

5.8.2 Costos

Los costos operaciones de implementar el hidrógeno verde son significativamente más bajos, en total un CAEX escogido para este estudio necesita cerca de una tonelada de hidrógeno verde al día para su funcionamiento [31], por lo que se estima un consumo total anual de 18.000 toneladas de hidrógeno, esto se traduce en un total de 27 millones de dólares anuales en consumo, contando la sensibilidad estipulada este valor se encuentra entre el rango de 21.6 – 32.4 [MU\$D/Año]. Al igual que en los casos anteriores, se presenta una Tabla resumen con las respectivas cantidades expuestas.

Tabla 11: Tabla resumen de consumo, costos totales y emisiones de quinto escenario

Quinto Escenario		
Consumo de Combustible	0	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H ₂	18000	[Ton H ₂ /Año]
Costo Diesel	0,0	[MU\$D/Año]
Costo H ₂	27,0	[MU\$D/Año]
Costo Total	27,0	[MU\$D/Año]
Emisiones	0	[Ton CO ₂ /Año]

5.9 Resumen de Resultados

A modo de comparación entre los respectivos escenarios contruidos anteriormente, en la siguiente Tabla resumen se expresa de manera grafica el resultado de los parámetros de costos

en materia de consumo de combustibles como cantidad de emisiones de gases efecto invernadero.

Tabla 12: Demostración grafica de la comparación entre escenarios en cuanto a consumo y costos.

	Primer Escenario	Segundo Escenario	Tercer Escenario	Cuarto Escenario	Quinto Escenario	
Consumo de Diesel	59	53	44	29	0	[Millones de Litros / Año]
Consumo de H2	0	1800	4680	9000	18000	[Ton H ₂ /Año]
Emisiones	250000	225000	185000	125000	0	[Ton CO ₂ /Año]
Costo Diesel	35,3	31,8	26,2	17,7	0,0	[MU\$D/Año]
Costo H2	0,0	2,7	7,0	13,5	27,0	[MU\$D/Año]
Costo Total	35,3	34,5	33,2	31,2	27,0	[MU\$D/Año]

6. Proyecciones de la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería

El presente capítulo describirá las tecnologías existentes de implementación del H₂V como energía combustible, los respectivos proyectos que se emplazan a nivel nacional como mundial entorno al elemento, con el fin de desarrollar una proyección en su uso en la minería a cielo abierto específicamente en la operación de transporte.

6.1 Tecnologías respectivas de la transición hacia el hidrógeno verde como combustible

Gracias a la alta demanda de la sociedad moderna de metales y materias primas extraídas por parte de la actividad minera, es que la cantidad de material removido es en escalas difíciles de comparar con otras industrias. Es por ello por lo que es un sector económico donde los equipos utilizados son sobredimensionados lo que se traduce en un consumo de energía significativo, principalmente de origen fósil. A su vez, dada la disminución de leyes del mineral y el aumento de la profundidad de las minas, los equipos de transporte han aumentado la demanda de combustibles fósiles.

A continuación, se extenderán los conceptos de cuáles son las tecnologías viables en torno al empleo del hidrógeno verde en la industria minera de cielo abierto. Para efectos de este estudio se basarán las tecnologías en camiones mineros de alto tonelaje.

6.1.1 Métodos de Empleo

Las potenciales aplicaciones en minería a cielo abierto son variadas, sin embargo, la más tentadora es sobre el motor de los CAEX, esto debido a su alto consumo de energía de origen fósil, concluyendo en grandes cantidades de emisiones, es por esto por lo que es el área que presenta las mejores oportunidades de desarrollo en torno a la energía alternativa que presenta el hidrógeno verde. Para la debida implementación en el cambio de los motores de los CAEX, existen dos alternativas las cuales son una combustión dual la cual junta tanto la combustión de materia fósil con el hidrógeno verde y su conversión total con el uso de celdas de combustible cargadas completamente con la energía verde.

6.1.1.1 Combustión dual

Esta alternativa se presenta como la aplicación del hidrógeno verde más viable a corto plazo, esto debido a que consisten en la transición del motor de los CAEX hacia una combustión interna mixta, entre diésel e hidrógeno, sustituyendo a la mitad o menos la cantidad de diésel utilizada en el proceso de combustión. La principal ventaja de esta aplicación es su confiabilidad debido a que no emplaza ningún cambio total en la estructura del motor, sino una adaptación de este. Esta forma de empleo reduce en cerca del 45% el consumo de combustible de origen fósil en un motor convencional [30].

6.1.1.2 Celdas a combustible

Emplazándose como la idea más ambiciosa de aplicar en el sistema de propulsión de los CAEX, esto debido a que modifica completamente el sistema, y lo intercambia por un sistema de baterías y celdas de combustible que permite que el vehículo se impulse completamente con hidrógeno verde. Esto lo vuelve en la alternativa preferida tanto ambiental como económicamente en un largo plazo, debido a la reducción en su totalidad de las emisiones por un motor de combustión interna convencional y por su bajo costo de operación.

En ambas tecnologías expuestas la potencia del camión puede llegar a mejorar pasando de los 1.800 [KWh] actuales de los motores convencionales de un CAEX con capacidad de carga de 300 toneladas a incluso 2000 [KWh]. A su vez, no solamente es mejor en términos de potencia, también se suma el factor de tiempo de carga de combustible, el cual es menor para el hidrógeno, rodeando los 9 minutos por cada 100 kilogramos de hidrógeno [30], las emisiones también son reducidas de manera exponencial como se ha mencionado anteriormente.

6.1.2 Costos de instauración de nuevas tecnologías

Instaurar nuevas tecnologías siempre conlleva un costo, sobre todo si no tienen ningún tipo de precedentes incluso fuera de la industria, es ahí donde el hidrógeno verde sobresale en cuanto al bajo costo que permite su utilización directa en el mediano corto plazo, en la Figura 21, se establecen las tendencias en la evolución total del costo de propiedad de las nuevas tecnologías utilizadas en CAEX [31], se puede apreciar como en los primeros años los costos son elevados debido a la instauración de estas mismas, pero en cortos periodos de tiempo su coste comienza a disminuir significativamente gracias a los bajos precios de mantención y utilización. A su vez, el costo de los usos diésel ira en aumento, debido a lo explayado anteriormente sobre las bajas en las leyes del mineral y la mayor profundidad de las minas a cielo abierto, esto solamente se traduce en un crecimiento del consumo de esta materia prima.

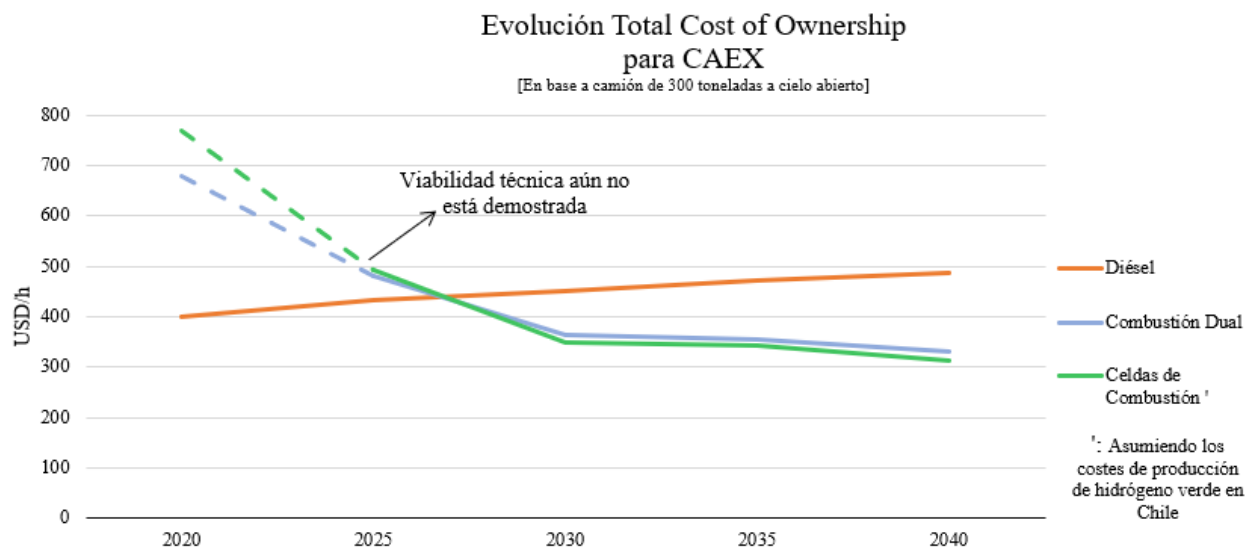


Figura 21: Evolución total de TCO para camiones CAEX, basado en camiones de 300 toneladas [31].

6.2 Procesos actuales a nivel nacional y en el sector minero

En el presente capítulo se extenderán los conceptos en cuanto a los desarrollos que ya se encuentran implementados de las tecnologías en base al hidrógeno verde, tanto a nivel nacional y lo que se espera para posicionarse como potencia mundial en la producción del elemento, como también en la propia industria minera con el fin de llegar a una minería cero residuos basada en la sustitución de combustibles fósiles.

6.2.1 Procesos actuales y estrategia de producción a nivel nacional

Chile planea posicionarse como líder mundial en el rubro de producción y exportación de hidrógeno verde, esto desde una estrategia nacional basada en primero un suministro nacional con el elemento y luego en materia de exportación. Hoy en día el país solo cuenta con una capacidad de producción de hidrógeno que se aproxima a los 4 [GW] en base a electrolizadores, esto se planea ampliar a 5 [GW] para el año 2025 lo que es equivalente a 200.000 [ton/año] de producción de hidrógeno verde. Para el año 2030 se plantea quintuplicar esta producción basada en una capacidad de 25 [GW] en base a electrolizadores, además de poseer valores inferiores a 1.5 [USD/Kg H₂] lo que significaría además de convertirse en la mayor producción a nivel mundial del elemento, también es la más barata [26].

Este progreso es basado en tres olas de desarrollo basadas en primero la suministración a nivel nacional del elemento, pasa a métodos de exportación antes del fin de la década de 2020-2030, para culminar con una industria desarrollada de energía en base a hidrógeno verde en escala masiva, estas tres olas son desarrolladas en la siguiente Tabla con mayor detalle.

Tabla 13: Descripción de estrategia nacional de producción y desarrollo de hidrógeno [26].

	Primera Ola	Segunda Ola	Tercera Ola
Base	Uso local basado en el alta demanda de energética y de hidrógeno	Comienzo de exportación y extensión de usos locales	Nuevo comercio de exportación en términos de una industria de producción masiva
Fundamento	Reemplazar el amoníaco importado en conjunto con reemplazar el H ₂ gris utilizado en refinación de combustibles	Exportación de amoníaco verde, como exportaciones H ₂ verde como producto. Producción a mayor escala, reemplazando combustibles fósiles en transportación	Descarbonización de industrias claves como aviación y barcos, tanto en rutas nacionales como internacionales. Crecimiento continuo de exportaciones basado en la necesidad de múltiples naciones de descarbonizar procesos industriales

Para llegar a los números y formas de desarrollo e implementación de la estrategia nacional, Chile actualmente cuenta con seis propuestas de proyectos a gran escala, además de proyectos a pequeña escala de producción de hidrógeno verde, se puede apreciar en la Tabla 14 el detalle de cada uno de estos.

Tabla 14: Descripción y ubicación de los seis proyectos más importantes de producción de hidrógeno verde en Chile [26].

Proyecto	Ubicación	Capacidad de Producción
Quintero Bay H2 Hub	Comuna de Puchuncavi y Quintero	10 MW 500 ton/año de H2
H2V Cap.	Biobío	20 MW 1.550 ton/año de H2
AMER	Antofagasta	80 MW 60.000 ton de e-metanol a partir de H2 y CO2 capturado desde una fuente fija
HYEX	Antofagasta	26 MW 18.000 ton de e-metanol en base a H2
HyPro Aconcagua	Valle de Aconcagua	20 MW 3.000 ton/año de H2
Faro del Sur	Magallanes	240 MW 25.000 ton/año de H2

Estos proyectos sumados a los proyectos CORFO que se han adjudicado cerca de US\$50 millones, permitirá acelerar la concreción de proyectos en miras de que para el año 2025 ya se encuentren operativos. Todos los proyectos en Chile hoy en día se traducen en una inversión cercana a los US\$1.000 millones, con una producción esperada de 45.000 toneladas del elemento anualmente, equivalente a una reducción de 600.000 toneladas de dióxido de carbono en el mismo periodo de tiempo [36] [37].

6.2.2 Procesos actuales en la minería

Desde la Figura 21 expuesta anteriormente se estima que para el año 2025, ya se demuestre la viabilidad técnica de las tecnologías a utilizar en la minería, esto puede ser incluso antes gracias a la fabricación y uso en faena de ya el primer CAEX potenciado completamente por hidrógeno verde por la empresa AngloAmerican, el cual se encuentra en Sudáfrica [38], en la mina de platino Mogalakwena, el cual consta de una capacidad de carga de 290 toneladas. Este suceso sin precedentes solo emplaza la idea de la posibilidad de formar una flota total de este tipo de camiones en cualquier faena a nivel nacional.



Figura 22: Camión a Hidrógeno Verde [39].

En Chile hoy en día solamente se encuentra una planta generadora de hidrógeno a nivel faena, también empleada por la empresa AngloAmerican, ubicada en Las Tórtolas, esta ocupa el agua reprocesada desde el ciclo productivo minero e inyectando energía desde dos plantas solares también construidas en el sector [39], esta solamente tiene la capacidad de producir 2kg de hidrógeno diarios por lo tanto se cataloga de baja escala, por lo que solo provee del elemento a grúas horquilla de 3 toneladas de carga.



Figura 23: Planta hidrógenera en Las Tórtolas [39].

6.3 Proyecciones de implementación de H₂V en la industria minera

Para el respectivo año 2022 la capacidad de producción de todo el sector minero de cobre fino es cercana 5.9 millones de toneladas producidas a nivel nacional, de la cual se espera un alza hasta incluso 7.03 millones de toneladas al 2030 [34], de estos totales cabe mencionar que actualmente los valores para minería a cielo abierto se encuentran cerca de los ordenes de 5.015 [Kton] y 5.975 [Kton] de cobre fino respectivamente para los mismos años, estos valores extrapolados a la cantidad de camiones se puede hablar de un total de flota cercana a los 3 mil y 3 mil quinientos para dichos años [34]. A su vez en terminos de emisiones para la industria general se traduce en cantidades que superan con creces la mayoría de las industrias a nivel nacional, siendo cerca de 15

mil toneladas de dióxido de carbono emitidas en el año 2022 y casi 18 mil toneladas para el año 2030 [34], esta comparación se puede apreciar gráficamente en la Figura 24.

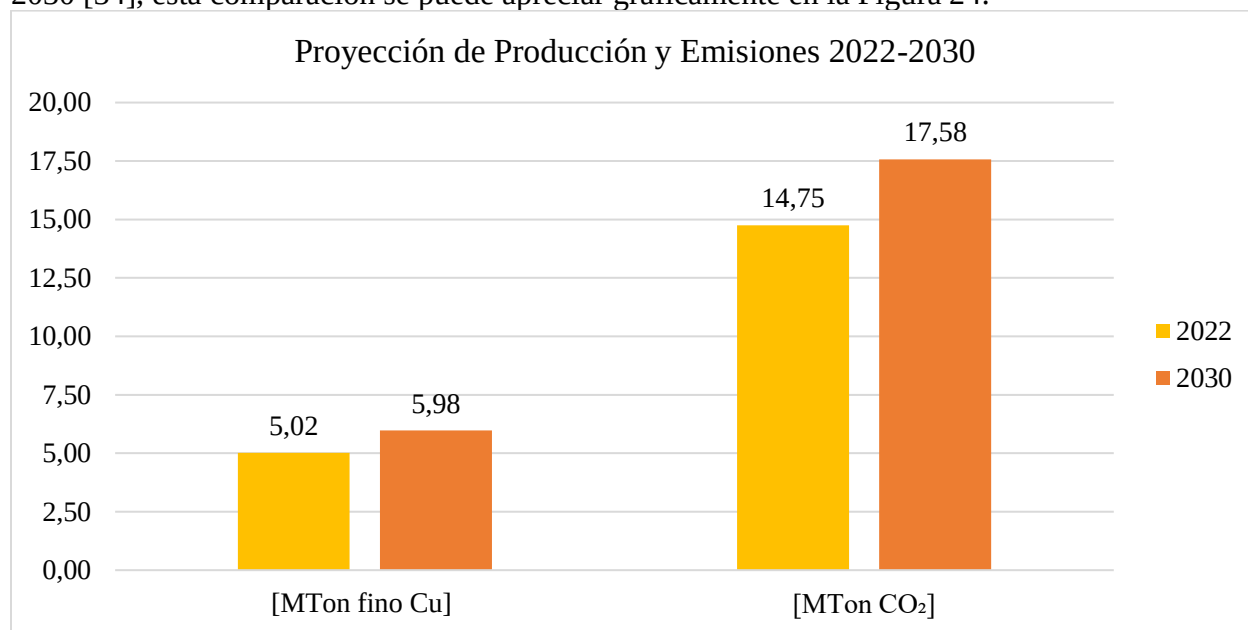


Figura 24: Representación gráfica de proyección de producción y emisiones para los años 2022 – 2030 [34].

Por otra parte se debe mencionar que en los planes del Gobierno Nacional para la totalidad de empresas se empuja a una reducción de emisiones hacia la atmósfera, siendo en el año 2050 donde se establece como objetivo la carbono neutralidad en la industria [35].

En cuanto a las tecnologías y formas de emplear el hidrógeno en la industria, se puede apreciar en la Figura 22, la forma más cercana tanto en temas de viabilidad técnica de implementación y costos son motores de combustión dual, esto gracias a la no alteración de los motores respectivamente utilizados en los CAEX actuales [28]. A su vez, este cambio significa un gran contraste en términos de emisiones, reduciendo cerca del 50% de ella, en cuanto a los costos de consumo de combustible si bien el cambio ronda solamente en cerca de un 4.2% de reducción, lo que se encuentra representado en una comparación entre los Escenarios 1 y 4, esto debido a la equitatividad en la flota presentada en este último.

Lo anterior se puede extrapolar a faenas más grandes generando cifras mayores generando ahorros de inversión que incluso pueden utilizarse para potenciar diferentes áreas de las mismas. Esta tecnología de implementación podría ser una opción viable para los próximos cinco a diez años [35], lo que significaría un gran avance tomando en cuenta el aumento tanto en la capacidad de producción de cobre fino y de emisiones respectivamente en el mismo periodo.

En cuanto a los CAEX potenciados completamente por hidrógeno verde, se debe desarrollar una mayor inversión en la construcción de nuevas plantas de producción de hidrógeno, como en los propios camiones debido al cambio respectivo en la totalidad del motor. Aunque sin duda, es donde se debería apuntar en un mediano plazo, cumpliendo así el objetivo de llegar a una minería con cero residuos en cuanto a emisión de gases efecto invernadero para el año 2050, lo que se ve reflejado en el Escenario 5 del presente estudio.

Sin embargo, acciones como las de la empresa AngloAmerican en su implementación de plantas hidrogeneras a pequeña escala como también del primer CAEX potenciado 100% con hidrógeno verde, dan lugar a que los procesos de transformación sean aun más rápidos que los plazos

estipulados en la estrategia energetica nacional, tambien por la gran presencia de dicha empresa a nivel nacional.

A su vez no se puede obviar la mayor la profundidad de las faenas mineras y que las bajas leyes de mineral son cada vez más recurrentes, lo que se traducen solamente en un mayor consumo de combustible desde la premisa de mayores distancias a recorrer y mayor material a remover, a esto se le suman los procesos actuales de exploración minera que han ido en aumento.

Los equipos de carguío como palas de gran y pequeño tamaño son una opción viable en la utilización del combustible verde, como se está haciendo en la faena de las Tórtolas con pequeños equipos de levante. A su vez, el proceso completo de conminución, entiéndase por chacado y molienda, es la segunda operación unitaria que más consume energía en la industria, siendo esta apuntada también para una transición hacia una matriz libre de GEI, sin embargo, por la potencia involucrada en el proceso, se vuelve un poco riesgoso utilizar elementos como el hidrógeno debido a su poca estabilidad como base para su impulsión, por lo que eventualmente se priorizaran transiciones hacia motores eléctricos. Los procesos respectivos luego de la conminución también cada vez implementan nuevas fuentes de energía, como los procesos de electro obtención y extracción por solvente que adquieren energía eléctrica de fuentes renovables.

Esto plantea un escenario optimista en miras de una meta no menor en la industria más contaminante del país, basando en una transición integra de todos los procesos hacia fuentes de energía amigables con el medio ambiente concluyendo en una matriz energética libre de emisiones.

7. Discusión

Los resultados del análisis cuantitativo en cuanto a costos de inversión en combustibles y cantidad de emisiones de GEI que se puede apreciar en la Tabla 12, se observan variaciones significativas al realizar la comparación entre escenarios, debido a que se habla del orden de millones de dólares.

Se aprecia que entre el escenario 1 (base), el cual está potenciado completamente por una matriz energética de combustibles fósiles, y el escenario 5, suministrado por una matriz basada en su totalidad por hidrógeno verde, la reducción de los costos de inversión en combustibles es cercana al 24%, lo cual se traduce en alrededor de 8 millones de dólares anuales que son ahorrados en este sector de costos.

A su vez, comparando ambos casos mencionados anteriormente, las emisiones se reducen en su totalidad, gracias a la cualidad del hidrógeno verde de no generar emisiones dañinas hacia la atmósfera.

En comparación a otro tipo de industrias, que son foco de crítica constante en torno a la contaminación que generan, se puede asegurar que el total de 250.000 toneladas de dióxido de carbono es equivalente a un 2.5% de la plaza automovilística total de Chile [41]. Además, cabe recordar que el caso de estudio se basa en una mina modelo con una capacidad de procesamiento de 85.000 toneladas de cobre fino anuales, lo que se traduce en una proporción cercana al 1.5% de la capacidad total de producción al año 2022 a partir del método extractivo de minería a cielo abierto, lo que puede representar un campo de mejora a gran escala, con cambios significativos en la reducción total de emisiones.

Si bien, las tecnologías de implementación no están aprobadas, se puede apreciar que, en cuanto a su viabilidad técnica a gran escala, tal como se aprecia en la Figura 22, es posible asumir que la forma de representar una ruta de transición es la de combustión dual, ya que solo se debe alterar el motor de los camiones actualmente funcionando, lo que implica no generar un cambio por completo del mismo. Si bien, es un cambio menor a un escenario óptimo, aun así, significa un cambio positivo hacia una carbono neutralidad. Esto se puede asociar a una comparación entre el escenario base con el escenario 4, el cual posee una cantidad equitativa entre camiones potenciados por H₂V y combustión interna, reduciendo la inversión en los costos totales de combustible de 35 a 31 millones de dólares anuales, acompañada de una disminución del 50% de las emisiones totales para la faena.

Se espera que para el año 2030 ambas formas de aplicar el hidrógeno verde en la operación unitaria de transporte en minera estén en funcionamiento [31], dejando una brecha significativa en términos de tiempo hasta el año 2050 con el fin de tener una posibilidad real y viable de llegar a la reducción total de las emisiones de gases efecto invernadero en todo el sector minero, considerando extrapolar el presente estudio hacia la totalidad de la industria minera, abarcando los métodos extractivos subterráneos, el resto de operaciones unitarias como los procesos de conminución y procesamiento de minerales posterior a la extracción.

Además en cuanto a la producción y consumo de energía en la industria, que las faenas utilicen energía producida en el país, no solo disminuye los costos de operación sino que además potencia

a la economía nacional, desarrollando nuevos mercados en el país, siguiendo además los planes ministeriales en torno al hidrógeno verde como elemento y como material energético.

8. Conclusiones

Mediante la revisión de antecedentes ardua realizada a lo largo del presente estudio, se puede decir que las nuevas tecnologías en torno a las energías renovables están en un auge debido a las consecuencias del cambio climático aumentado en las últimas décadas.

La industria minera, en especial el método extractivo de minería a cielo abierto se emplaza como el principal proceso a mejorar para poder alcanzar las mejoras esperables como país en términos de carbono neutralidad y mitigación de la contaminación hacia la lucha contra el calentamiento global.

En cuanto al hidrógeno verde, se posiciona potencialmente a Chile como el país más apto para su implementación a nivel industrial en materia de composición de otros materiales como amoníaco y refinaciones de materiales, como en su faceta energética.

El Hidrógeno Verde a su vez, en su faceta energética es bastante más viable que los combustibles fósiles, desde su premisa de producción hasta en sus facetas energéticas, triplicando las propiedades por mismo peso que los combustibles fósiles utilizados contemporáneamente.

La evaluación económica realizada para los respectivos casos arroja una reducción de cerca del 24% de costos al pasar de una flota de 50 camiones potenciados con combustibles fósiles a potenciados por Hidrógeno Verde, lo que se traduce en cerca de 8 millones de dólares anuales ahorrados en utilización de energía.

Para las respectivas formas de implementación de Hidrógeno Verde en los motores de los CAEX, la manera más viable de hacerlo es a través de motor de combustión dual, esto debido a que los motores no deben ser alterados en gran parte, como si se debe hacer con un motor completamente potenciado a través de Hidrógeno Verde.

En cuanto a la meta de llegar a una industria minera con carbono neutralidad al año 2050, se ve un escenario bastante positivo, esto en gran parte debido a la presencia de empresas pioneras en sus desarrollos de movilidad alternativa como AngloAmerican, no solo incursionando en términos de Hidrógeno Verde como también en electromovilidad.

8.1 Recomendaciones

Seguir con esta línea de estudios en términos de factibilidad de implementación hacia la industria con el fin de llegar a una minería cero residuos.

Utilizar los recursos naturales presentes en el país con el fin no solo de aportar a la industria minera, sino también posicionar a Chile como líder en el rubro a nivel mundial.

Expandir este estudio hacia la minería subterránea en Chile, debido a la proximidad de grandes faenas como Chuquicamata y Andina a su paso a este tipo de extracción, lo que puede generar considerables mejoras en cuanto a polución en túneles y espacios cerrados.

Expandir este estudio en el resto de las operaciones unitarias en la minería, como lo son chancado y molienda y procesamiento de los minerales extraídos, buscando el máximo provecho al recurso del hidrógeno verde.

Extrapolar el presente estudio, con el fin de que el Hidrógeno Verde pueda ser utilizado en la movilidad en el resto de las industrias.

9. Referencias

- [1] **The Intergovernmental Panel on Climate Change**, «Global Warming of 1.5 °C,» 2022.
- [2] **Minería Chile** «La carrera por el Hidrógeno verde en Chile y el mundo».
- [3] **Comisión Chilena del Cobre** , «Estadísticas Consumo de Energía de la Minería del Cobre al año 2017,» 2018.
- [4] **Comisión Chilena del Cobre**, «Informe de Proyección del Consumo de Energía en la Minería del Cobre al año 2032,» 2022.
- [5] **Plett Erwin**, «Hidrógeno Verde: El futuro Energético de Chile.,» Congreso Futuro , 2021.
- [6] **Comisión Chilena del Cobre**, «Las Energías Renovables en la Minería Chilena del Cobre,» Chile , 2021.
- [7] **The Intergovernmental Panel on Climate Change**, «Glosario,» 2022.
- [8] **Comisión Chilena del Cobre**, «Cambio Climático, Que es y sus Consecuencias,» Responsabilidad Social Empresarial y Sustentabilidad, 2022.
- [9] **Research Center for Climate and Resilience**, «¿Qué es la Descarbonización?,» 2019.
- [10] **Ministerio de Energía de Chile**, «¿Qué son las Energías Renovables?,» 2020.
- [11] **Finance Bloomberg New Energy**, «Proyecciones en Sudamerica,» 2016.
- [12] **Fundación Chile**, «Chile: Uno de los jugadores claves en la misión Hidrógeno Verde,» 2021.
- [13] **Alvarado Felipe Andrés Díaz**, «Gasificación de Carbón en Chile, para obtención de Hidrógeno y Electricidad en planta de ciclo combinado,» Santiago, 2007.
- [14] **Fierro José Luis G**, El Hidrógeno: Metodologías de Producción, Madrid, 2011.
- [15] **Armijo Javier Ignacio Vermeersch**, «Diseño y Construcción de una Celda Demostrativa para la Producción de Hidrógeno a partir de la Electrólisis del Agua,» Santiago , 2018.
- [16] **Baykara Sema Z**, «Experimental Solar Water Thermolysis,» ScienceDirect, 2004.
- [17] **Induambiente**, «Claves de las energías renovables,» 2022.
- [18] **Rodríguez María Jose Ulloa**, «Evaluación Técnica y Económica de una Planta Generadora de Energía Eléctrica bazada en pozas Solares en Comunidades Rurales,» 2017.
- [19] **Comisión Nacional de Energía**, «Anuario Estadístico de Energía,» 2021.
- [20] **Consejo Minero**, «Cifras Actualizadas de la Minería,» Santiago, 2022.
- [21] **Servicio Nacional de Geología y Minería**, «Anuario de la Minería de Chile,» 2021.
- [22] **Fuentes Edward**, «Tecnologías Limpias de Generación y Almacenamiento Energético para el desarrollo de una Minería Carbono Neutral al 2050,» de Energías Renovables: Soluciones para la Industria Minera, Santiago , 2022.
- [23] **Cornejo Mariana Rojas**, «Descripción Cuantitativa de los Procesos de Extracción y Reducción de Mineral en la Minería de Cobre a Cielo Abiero,» 2009.
- [24] **McKinsey & Company**, «Chilean Hydrogen Pathway, Final Report,» 2020.
- [25] **Ministerio de Energía de Chile**, «Estrategia nacional energías renovables,» 2022.
- [26] **Ministerio de Energía de Chile**, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,» 2022.

- [27] **Ministerio de Energía de Chile**, «Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones,» 2022.
- [28] **New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots**, «Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling,» 2017.
- [29] **Deloitte China**, «Powering the Future of Mobility,» 2020.
- [30] **H2 Chile**, «Almacenamiento de Hidrógeno,» 2021.
- [31] **Asociación Chilena de Hidrógeno**, «Hidrógeno Verde en Minería,» 2021.
- [32] **Villanueva Brandon Alexis Flores**, «Modelo predictivo del movimiento mina utilizando machine learning en mina los bronces - AngloAmerican,» 2022.
- [33] **Empresa Nacional de Petróleo**, «Información para el Mercado,» Mayo, 2022.
- [34] **Comisión Chilena del Cobre**, «Proyección de la producción de cobre en Chile 2019 - 2030,».
- [35] **Sociedad Nacional de Minería**, «Carbono Neutralidad y Minería,» 2022.
- [36] **Estudios de la Asociación Chilena de Hidrógeno**, «Proyectos de hidrógeno verde en Chile y su avance en torno a años anteriores,» 2022.
- [37] **Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento**, «Proyectos para producir hidrógeno verde en el país,» Santiago, 2022.
- [38] **Anglo American**, «FutureSmartMining: Operaciones cada vez más seguras, sustentables y eficientes,» 2022.
- [39] **Anglo American**, «Anglo American genera la primera molécula de hidrógeno verde para vehículos mineros cero carbono en Chile,» 2021.
- [40] **Fundación Tecnológica**, «Carbo Neutralidad y Minería,» 2022.
- [41] **Motor Pasión**, «Auto eléctrico en comparación con combustión interna: ¿Realmente hay una diferencia entre emisiones de dióxido de carbono?,» Mexico , 2022.
- [42] **Yasna K. Palmeiro - Silva**, «La amenaza del cambio climático a la salud de la población y la necesidad urgente de actuar,» Red Med Chile, pp. 2-7, 2020.
- [43] **Comisión Nacional de Energía**, «Demanda Energética Nacional de Largo Plazo,» p. 14, 2009.
- [44] **Comité Solar e Innovación Energética**, «Hidrógeno Verde en Chile: Oportunidades y Desafíos,» Santiago , 2020.
- [45] **Instituto de Ingenieros de Minas de Chile**, «Monitoreo de la Mediana y Pequeña Minería Chilena,» 2016.
- [46] **Cornejo Mariana Rojas**, «Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto,» 2019.
- [47] **Empresa Nacional de Petróleo**, «Reporte Financiero Junio 2022,» Santiago , 2022.

