



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN Y  
ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
ESCUELA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS Y MEDIO AMBIENTE

ESTUDIO SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DEL HIDROGENO VERDE COMO  
ENERGÍA SOSTENIBLE EN LA MINERIA CHILENA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN  
PREVENCIÓN DE RIESGOS Y MEDIO AMBIENTE

AUTORES:

SANCHÉZ FUENTES, JAVIERA PAZ

TAPIA GEREZ, MARÍA IGNACIA

PROFESOR GUÍA:

FREUNDENBERG CAÑETE, TÓMAS

SANTIAGO – CHILE

2021

## Autorización para la Reproducción del Trabajo de Titulación

### 1. Identificación del trabajo de titulación

Nombre del alumno: María Ignacia Tapia Gerez  
Rut: 19171991-3  
Dirección: Noria 117b, Ñuñoa  
E-mail: maria.tapiag@utem.cl  
Teléfono: 9 61525130

Título de la tesis: Estudio sobre la implementación del hidrogeno verde como energía sostenible en la minería chilena  
Carrera: Ingeniería Civil en Prevención de Riesgos y Medio Ambiente  
Título al que opta: Ingeniero Civil en Prevención de Riesgos y Medio Ambiente

### 2. Autorización de Reproducción

Se autoriza la reproducción total o parcial de este trabajo de titulación, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

En consideración a lo anterior, se autoriza su reproducción de forma (marque con una X):

<input checked="" type="checkbox"/>	Inmediata
<input type="checkbox"/>	A partir de la siguiente fecha: _____ (mes/año)

Fecha: 01 de marzo 2021 Firma:



Esta autorización se otorga en el marco de la ley N°17.336 sobre Propiedad Intelectual, con carácter gratuito y no exclusivo para la Institución.

**NOTA OBTENIDA:**

6,7



The image shows a handwritten signature in blue ink to the left of a circular official stamp. The stamp contains the text 'UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA' around the perimeter and 'ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS' in the center. There is a small star at the bottom of the stamp.

---

Firma y timbre autoridad responsable

## Autorización para la Reproducción del Trabajo de Titulación

### 1. Identificación del trabajo de titulación

Nombre del alumno: Javiera Paz Sánchez Fuente  
Rut: 19.408.901-5  
Dirección: Lago Risopatrón 4621, Puente Alto.  
E-mail: javiera.sanchezf@utem.cl  
Teléfono: +56950499233

Título de la tesis: Estudio sobre la implementación del hidrogeno verde como energía sostenible en la minería chilena.  
Carrera: Ingeniería Civil en Prevención de Riesgos y Medio Ambiente  
Título al que opta: Ingeniero Civil en Prevención de Riesgos y Medio Ambiente.

### 2. Autorización de Reproducción

Se autoriza la reproducción total o parcial de este trabajo de titulación, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

En consideración a lo anterior, se autoriza su reproducción de forma (marque con una X):

<input checked="" type="checkbox"/>	Inmediata
<input checked="" type="checkbox"/>	A partir de la siguiente fecha: _____ (mes/año)



Fecha: xx de xxx 2021 \_\_\_\_\_ Firma:

Esta autorización se otorga en el marco de la ley N°17.336 sobre Propiedad Intelectual, con carácter gratuito y no exclusivo para la Institución.

**NOTA OBTENIDA:**

---

Firma y timbre autoridad responsable

## **DEDICATORIA**

*A Claudio Omar Sánchez Vera, mi abuelo, quien anhelaba este momento, y que a pesar de que hoy no esté presente, gracias a él he logrado ser lo que soy.*

*Te llevo en mi corazón todos los días*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A María Inés Soto, mi madre y abuela, que es un pilar fundamental en mi vida y es quien siempre me ha dado las fuerzas de seguir adelante, eres la que impulsa mis sueños, y cada uno de mis logros son también tuyos.*

*A mi padre Claudio Sánchez quien me acompañó durante largas horas escuchándome relatar mis trabajos para ayudarme a mejorarlos y siempre me dio su apoyo en cada una de mis ideas y proyectos.*

*A Konstantino Ignatiadis, mi pareja, quien es mi apoyo incondicional y me ha acompañado a lo largo de mi carrera universitaria, gracias por acompañarme cuando mis ánimos decaen, me animas a superarme cada día.*

*A mi tío Javier Sánchez, quien ha sido un segundo padre para mí y siempre me ha apoyado y aconsejado cuando lo he necesitado.*

*A mis tíos Alejandro y Cynthia por apoyarme durante todo el desarrollo de mi carrera universitaria.*

*Finalmente, a mi gatita Mía quien fue mi compañera y me acompañó en todos mis momentos de estudio.*

## **DEDICATORIA**

*Dedicar este logro a mis hermanas Juliette Tapia y Javiera Ortiz*

*Las quiero mucho y siempre estaré para ustedes.*



## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecer a mi padre Juan Ignacio Tapia Adasme, por su amor y motivación que me ha dado, por creer en mí y porque a pesar de no vivir juntos siempre has estado conmigo.*

*Quiero agradecer profundamente a mi madre María Auxiliadora Gerez Batista que me dio el mejor regalo de todos: me permitió el poder estudiar brindándome su apoyo incondicional, me ha dado un hogar con mucho esfuerzo junto a mi hermana valoro mucho todo lo que has hecho por nosotras, te amo y te admiro inmensamente. además, agradecer a su compañero y pareja Exequiel Antonio Peña que ha estado con nosotras.*

*Agradecer a Felipe Ignacio Tapia Martínez y a su familia, en especial Carolina Elisa Martínez la cual por muchos años me acogieron como de su familia y me hicieron parte de ella dándome un apoyo importante.*

*Agradecer a mi amiga Sylvia Francisca Ulloa Ruiz por su amistad todos estos años y por su apoyo incondicional.*

*Quiero agradecer por último a Dios, que nunca me ha abandonado he encontrado en él una fuente de amor infinito y apoyo. Gracias por mostrarme el camino e iluminarme en días no tan buenos.*

## Tabla de Contenido

RESUMEN.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Antecedentes generales.....	17
1.2. Justificación del problema .....	21
2. Objetivos .....	23
2.1. Objetivo general.....	23
2.2. Objetivos específicos .....	23
3. MARCO TEÓRICO.....	24
3.1. Minería .....	24
3.1.1. Procesos Mineros .....	25
3.2. Energía.....	27
3.2.1. Tipos de Tecnologías de producción energéticas .....	29
3.2.2. Efectos del uso de las Energías.....	30
3.2.3. Almacenamiento .....	31
3.2.4. Energía en los procesos mineros .....	31
3.3. Matriz Energética.....	32
Balance nacional de energía (BNE) .....	34
Consumo Energético en el Sector Minero .....	35
Emisiones de carbono de minería .....	36
Hidrógeno.....	38
Hidrógeno Verde .....	39

Electrólisis .....	41
Normativa involucrada.....	42
4. METODO DE INVESTIGACIÓN .....	44
4.1. Recopilación de información.....	45
4.2. Análisis y procesamiento de la información:.....	46
4.3. Presentación de resultados .....	47
5. DESARROLLO .....	48
5.1. Que es el hidrógeno verde y cómo se produce .....	48
5.1.1. Electrolisis alcalina.....	49
5.2. Aplicaciones del hidrógeno verde.....	50
5.3. Beneficios del uso del hidrógeno verde como energía renovable. ..	51
5.4. En qué procesos mineros es viable .....	53
5.4.1. Implementación en camiones .....	53
5.4.2. Abastecimiento eléctrico en instalaciones y telecomunicaciones mineras .....	56
5.5. Costos de la generación de hidrógeno verde .....	57
5.6. Proyectos y empresas involucradas .....	59
5.6.1. Primer generador de hidrogeno verde del país.....	59
5.6.2. Proyecto HyEx .....	59
5.6.3. ALSET GLOBAL.....	60
5.6.4. CSIRO, ENGIE Y MINING3.....	61
5.6.5. Universidad Técnico Federico Santa María, <i>Ballard Power Systems Inc</i> , <i>cnh2</i> , entre otros .....	62
5.6.6. Proyectos a nivel internacionales.....	63

5.7. Acuerdo de reducción de emisiones.....	63
5.7.1. ¿Por qué es importante reducir emisiones? .....	65
5.8. Beneficios y Desventajas de la implementación de Hidrógeno Verde .....	65
5.9. Seguridad y normativa.....	68
5.10. Hidrogeno verde en Chile.....	69
5.11 Medidas de control .....	70
5.11.1. Manejo seguro del Hidrógeno.....	71
5.11.2. Seguridad en vehículos .....	71
5.11.4. Almacenamiento de H2.....	74
Almacenamiento de gas a presión.....	74
Almacenamiento de hidrógeno líquido.....	75
5.11.5. Discusiones con respecto a la seguridad .....	75
5.12. Propuesta de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno.....	75
5.13. Normativa internacional.....	77
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
6.1. Restricciones .....	78
6.2. Criterios para Selección de Tecnología a utilizar.....	79
6.2.1. Criterios para la selección del método para la obtención de hidrógeno verde.....	81
6.2.2. Criterios para la elección de compra del hidrógeno verde.....	82
6.3. Plan de acción.....	85
6.3.4. Medidas de acción.....	87
7. CONCLUSIÓN .....	88

8. BIBLIOGRAFIA .....	92
-----------------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 Mina subterránea Chuquicamata .....	26
Figura 2 Mina rajo abierto Codelco .....	26
Figura 3 Matriz energética primaria de Chile año 2019, (BCN, 2021). .....	33
Figura 4 Consumo energético total de Chile por sector económico, año 2019, (BCN, 2021). .....	34
Figura 5 Balance energético 2019, fuente: Ministerio de Energía.....	34
Figura 6 Distribución del consumo de combustibles en minería del cobre.....	36
Figura 7 Huella de carbono cátodo del cobre .....	37
Figura 8 Producción de H2 Gris.....	39
Figura 9 Producción H2V .....	39
Figura 10 Método de investigación .....	44
Figura 11 Estructura motora dual Hidrogeno Verde /Diesel.....	54
Figura 12 Celda de combustible .....	55
Figura 13 Intercambio químico electrólisis.....	56
Figura 14 Minería subterránea aplicación de H2V para las instalaciones.....	57
Figura 15 Plan de reducciones Alset Global .....	61
Figura 16 Comparación de parámetros relevantes para la seguridad .....	70
Figura 17 Hidrogeno vs Gasolina: fuga de combustible con incendio.....	73
Figura 18 Ciclo de vida del hidrogeno verde.....	80
Tabla 1 Energías primarias y secundarias de origen .....	28
Tabla 2 Características de las fuentes energéticas basadas en hidrógeno .....	38

Tabla 3 Ventajas y desventajas de la aplicación del H2V .....	67
Tabla 4 Criterios fase1 .....	81
Tabla 5 Criterios para la compra de H2V .....	82
Tabla 6 Criterio para el consumo energetico de H2V .....	83
Tabla 7 Criterios selección de seguridad y normativa interna.....	84
Tabla 8Criterios para la Operación de una planta minera con H2V .....	84
Tabla 9 Alineamientos para el plan de acción.....	86

## **RESUMEN**

El planteamiento del problema nace ante la necesidad actual de utilizar ENRC que permitan la sostenibilidad de la minería con el fin de lograr reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; el proyecto realiza un estudio de la implementación del Hidrógeno Verde en aplicado a la minería. Se expone que el Hidrógeno Verde es viable para implementar en minería y se da a conocer los beneficios que trae consigo. Posteriormente se explican las metodologías de evaluación y la selección de tecnología asociada a la implementación del Hidrógeno Verde, para lo cual fue necesario la utilización de un marco teórico. Los resultados generados a partir de la evaluación técnica-ambiental establecieron los parámetros que cualquier empresa minera debería tener en cuenta previo a la implementación del Hidrógeno Verde. A partir del análisis general, se logró concluir que la principal importancia de que las empresas mineras del país potencien el uso de ENRC, ya que permitirá la mitigación de los efectos del cambio climático y reducir las emisiones de GEI.

Es así como la realización de la presente memoria de título permitió identificar y generar propuestas de soluciones a través del estudio de ingeniería en conjunto con establecer un plan de acción para la implementación del Hidrógeno Verde donde se proponen diferentes usos enfocados mayormente en la faena de carguío y transporte.

### **PALABRAS CLAVES**

Cambio climático; Minería; Hidrógeno Verde; Sustentabilidad; Desarrollo Sostenible; economía del Hidrogeno; Celdas de Combustible; ENRC; Medio Ambiente; Prevención de Riesgos;

## **ABSTRACT**

The approach to the problem arises from the current need to use ENRC that will allow the sustainability of mining to achieve the reduction of greenhouse gas emissions; The project carries out an implementation study of Green Hydrogen applied to mining. It is stated that Green Hydrogen is viable to implement in mining and the benefits that it brings are disclosed. Subsequently, the evaluation methodologies and the selection of technology associated with the implementation of Green Hydrogen are explained, for which the use of a theoretical framework was necessary. The results generated from the technical environmental evaluation established the parameters that any mining company should take into account prior to the implementation of Green Hydrogen. From the general analysis, it was possible to conclude that the main importance of the mining companies of the potential country is the use of NCRE, since it was possible to mitigate the effects of climate change and reduce GHG emissions.

Thus, the realization of this title report to identify and generate solution proposals through the engineering study in order to establish an action plan for the implementation of Green Hydrogen where different uses are proposed focused mainly on the work of loading and transportation.

## **KEYWORDS**

Climate change; Mining; Green Hydrogen; Sustainability; Sustainable development; Hydrogen economy; Fuel Cells; ENRC; Environment; Risks prevention.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes generales

La huella de carbono del sector minero representa una cifra alarmante debido al uso de fuentes de energías no renovables como lo son los derivados del petróleo. En el proceso de carguío y transporte el combustible utilizado es Diesel y petróleo y para los procesos de refinación del material se atribuye al uso del carbón como uno de los más contaminantes.

Es una realidad que la Minería es un pilar importante en la economía chilena ya que se le atribuye el 11 % del PIB nacional, el 60% de las exportaciones y el 20% de los ingresos fiscales (Consejo Minero, 2013).

Estos datos evidencian los beneficios de esta industria proporcionando una economía sólida no obstante viene de la mano con importantes impactos negativos en el medio ambiente, hay otros tipos de energías no convencionales que son renovables y que su incorporación a la matriz energética constituirá importantes medidas para disminuir la huella de carbono.

Dicho lo anterior, se entiende que, la industria minera es el consumidor principal de energía eléctrica con un 53% de consumo energético aumentando en un 89,9% el consumo eléctrico por parte de esta industria (Revista ei, 2020). Por lo que, es un hecho, que se debe el mitigar y minimizar el gasto energético de esta industria, puesto que se convierte en uno de los mayores responsables de la generación de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático el cual se hace cada vez más amenazante con ser irreversible para el medio ambiente. Uno de los objetivos propuesto por Chile para combatir el cambio climático es la descarbonización total al año 2050 y ya se ha puesto en

marcha un plan de acción que propone la innovación como factor principal de cambio.

Una excelente innovación en el sector energético sería la implementación en la matriz energética secundaria del Hidrogeno verde como energía renovable no convencional. Puesto sus características lo vuelven una potencial fuente inagotable de energía.

Es por esto por lo que, el objetivo general del trabajo de título es dar a conocer detalladamente todos los aspectos que abarca el uso del hidrógeno verde en la minería, como, por ejemplo; Costo de implementación, beneficios, desventajas, marco legal, etc. ya que el hidrógeno verde es un tipo de energía renovable donde se utilizan básicamente energía eólica y solar, método que permitiría eliminar gran parte de las emisiones de carbono del sector industrial.

La finalidad es lograr persuadir a las empresas de sumarse a esta iniciativa exponiendo su impacto en el medio ambiente y los beneficios que trae consigo, la estrategia que se utilizará para lograr el cometido será poner a disposición pública una página web donde se podrá encontrar todo lo que una empresa minera necesita saber para crear un compromiso sustentable a través del uso del hidrógeno verde.

Chile es uno de los países con la mayor posesión de glaciares a nivel global pero hoy en día las emisiones de CO<sub>2</sub> producto de la actividad humana, sobre todo las emisiones de gases de efecto invernadero desde la minería chilena en conjunto ponen en peligro a cerca de 7500 glaciares chileno (cnn chile, 2020) el deshielo provoca graves cambios en el suelo con inundaciones y la desaparición de importantes ecosistemas de los sectores afectados. Si bien existe una ley que los protege, se señala como a los responsables de este impacto ambiental en nuestro país a empresas mineras.

Los gases de mayor importancia que aportan al efecto de invernadero global son aquellas tales el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) y Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) todos ellos generados por el consumo de combustible Diesel. El proceso de Transporte y carguío de la actividad minera es en donde se produce la mayor producción y contribución de estos gases a la atmosfera, puesto que la altura en la que se encuentran las minas a rajo abierto y subterráneas es un importante factor que produce en las maquinarias de transporte cambios como lo es en la eficiencia y potencia energética produciendo así un mayor requerimiento de estos combustibles para lograr el trabajo deseado.

La utilización de energías renovables en estos procesos como lo es el hidrogeno verde el cual no sufre alteraciones de su trabajo en altura y la gran energía que este puede llegar a liberar lo hace el recurso ideal.

Chile es un país propicio para la producción de hidrogeno verde ya que cuenta con condiciones climáticas favorables para su producción. Nuestro país enfrenta una meta de descarbonización para el año 2050 lo que el h<sub>2</sub> podría ser una solución para que el sector minero sea sostenible.

Una de las principales ventajas son las cero emisiones que genera el uso del hidrógeno un gran salto para la sustentabilidad sería el poder producir metales con bajas emisiones de contaminantes. Las empresas chilenas tienen la obligación de contribuir a la solución del Cambio Climático que acordó Chile con la firma del tratado de París en la COP21 el 2015, y el uso de energía limpia y renovable y productos verdes es un excelente paso en la dirección correcta.

Existen tres combustibles de origen fósil los cuales han sido los más usados en la historia de la humanidad, corresponden a: El carbón, el petróleo y el gas (especificar)

Por otra parte, también hay fuentes de energía no renovable que no tienen un origen fósil. Un claro ejemplo de estas es la energía nuclear, la cual ha sido

la energía no renovable más usada desde que en 1954 se abriera, en la antigua Unión Soviética, la primera central que alimentaba de electricidad. Elementos como el uranio liberan una gran cantidad de energía cuando se dividen sus átomos, esto se define como “Fisión nuclear”.

A pesar de los diferentes beneficios que nos han aportado las energías no renovables a lo largo de tiempo, porque no se puede negar que la mayoría de los avances han sido gracias a estas, es de vital importancia conocer que consecuencias trae consigo el uso de estas, ya que provocan una contaminación directa, y es que, este tipo de energía no solamente libera gases de efecto invernadero, sino que también gases y partículas contaminantes a la atmósfera, tanto así, que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que unos ocho millones de personas mueren anualmente por la contaminación del aire.

Se sabe que, en todos los rubros son utilizadas las energías no renovables, pero hay algunos como, por ejemplo; la minería, que es una de las actividades productivas más invasivas, ya que causa un fuerte impacto ambiental en las zonas donde se desarrolla, sobre todo en los siglos XIX y parte del XX donde prácticamente no existía conciencia ambiental, ya que se prioriza siempre el progreso económico por sobre las materias medioambientales.

La huella de carbono del sector minero siempre ha representado una cifra considerable por su uso de energías no renovables, ya que en dicho rubro usan mayoritariamente el carbón como combustible, es decir que la actividad minera trae consigo variados impactos negativos en el medio ambiente, hay otros tipos de energías no convencionales que son renovables y que su incorporación a la matriz energética constituirá importantes medidas para disminuir la huella de carbono.

Es por todo lo antes mencionado que, una energía renovable que se debe considerar en el rubro minero en Chile, es el “Hidrógeno Verde”, esta energía

renovable se obtiene en base a la electrólisis, la cual emplea una corriente eléctrica para dividir agua en hidrógeno y oxígeno en un aparato llamado electrolizador, el también denominado “H2V” es producido a partir de fuentes renovables como la energía solar, eólica, geotérmica, entre otras, lo que lo convierte en una fuente de energía 100% sostenible, su único contra es que suele ser mucho más costoso de producir que el hidrógeno tradicional.

## 1.2. Justificación del problema

El H<sub>2</sub>V se ha convertido en una de las alternativas energéticas más prometedoras para lograr los objetivos climáticos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Su principal potencial para desfosilizar el sistema energético y otras actividades económicas, se apoya principalmente en tres aspectos que son claves; el primero es que puede ser producido sin emitir gases de efecto invernadero ni contaminantes, el segundo es que su producción puede sostenerse mientras se disponga de fuentes de energía renovables y, por último, puede ser utilizado en todos los sectores que consumen energía y, como materia prima en diversas industrias.

En muchos casos empresas, están reacias a cambiar su fuente de energía no renovable a opciones más amigables con el medio ambiente, y esto se debe principalmente a los costos o bien al desconocimiento sobre el tema, por eso es importante mencionar que, con respecto a los costos de la implementación del H<sub>2</sub>V, Chile ha sido identificado como uno de los países donde se puede producir el H<sub>2</sub>V más económico del mundo, esto se debe al costo nivelado de su producción basada en energía solar fotovoltaica y eólica en los sitios con mayor potencial de este tipo de energía.

Cuando hablamos de H<sub>2</sub>V en minería nos referimos al posible reemplazo de energías no renovables en aspectos de combustibles para vehículos, es decir transporte, o bien como sistema de almacenamiento de energía eléctrica, hasta

podríamos hablar de avanzar hacia un sistema energético con H2V descentralizado. Hoy en día en Chile, no existe un gran número de proyectos que involucren al H2V, y es que este, se encuentra en pleno desarrollo, aunque sí hay estudios y ensayos realizados por parte de las mineras chilenas, no hay empresas que lo implementen al 100% si no que llevan el tema con prudencia.

El Hidrógeno verde podría reemplazar el alto consumo de combustibles fósiles en la minería, es decir, este lograría descarbonizar la energía utilizada, ya que permite hacer más sustentables muchos usos de la energía y utilizar electricidad renovable en aplicaciones “no electrificables”; como por ejemplo en vehículos pesados de minería CAEX, vehículos de largo alcance (camiones, buses, barcos y aviones), o aquellos que operan 24/7 (grúa horquilla).

Siendo que hoy se importan año a año unos US\$8.000 millones en combustibles fósiles, a lo que se debe agregar el daño ambiental que originan y, sin embargo, Chile es rico en energías renovables para generarlas aquí, adicionalmente tiene un inmenso potencial para exportar energía renovable al mundo. Es por todo esto, que la “Economía del Hidrógeno” debe ser una prioridad de estado en el país (Revista ei, 2020)

Es por lo anterior que en el presente trabajo de título tendrá como finalidad exponer información valiosa y necesaria para la implementación del Hidrogeno verde en el rubro minero determinando así con la información recopilada y analizada porque el hidrogeno verde es la apuesta energética más prometedora en comparación con las demás energías renovables convencionales. Para ello se acogerá normas internacionales y nacionales regulatorias en este tipo de recurso energético con el fin de regularizar el proyecto de la implementación de Hidrogeno verde en instalaciones mineras.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

- ☞ Estudio para la implementación del Hidrogeno Verde como energía sostenible en la minería chilena.

### 2.2. Objetivos específicos

- ☞ Desarrollar un diagnóstico del estado del arte acerca del Hidrogeno Verde en Chile.
- ☞ Analizar las alternativas de utilización de energía en Chile y sus fuentes.
- ☞ Desarrollar un estudio para la implementación de hidrogeno verde en el rubro minero focalizado mayormente en el proceso de transporte y carguío.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Minería

La minería es una actividad netamente descentralizada, ya que, se desarrolla en zonas inhóspitas y por lo general muy altas, está enfocada en la extracción selectiva de los minerales y otros materiales de la corteza terrestre, de los cuales se puede obtener un beneficio económico, por esta misma razón, la minería ha tenido un significativo impacto en el desarrollo de muchos países.

El proceso inicia con la búsqueda de recursos minerales, para ello, un equipo de geólogos visita el área y extrae muestras de agua, suelos y rocas, si obtienen buenos resultados los estudios y la cantidad de mineral es importante nace un proyecto es exploración minera.

Cuando un proyecto es declarado viable se solicita una licencia ambiental, la cual exige presentar un estudio de impacto ambiental, el cual busca la manera de prevenir, mitigar y compensar posibles impactos en el área y la comunidad. Una vez que se obtienen los permisos ambientales emitidos por la autoridad competente se inicia la etapa de producción minera.

Las minas pueden clasificarse siguiendo varios criterios, el más amplio tiene en cuenta si las labores se desarrollan por encima o por debajo de la superficie, dividiéndolas respectivamente, en minas a cielo abierto y en minas subterráneas, cuando el mineral se encuentra disperso o esparcido se trabaja a tajo abierto, para esto, se debe extraer la tierra que cubre el mineral usando explosivos y grandes equipos móviles.



### 3.1.1. Procesos Mineros

1) Extracción: Esta etapa consiste en extraer la roca desde la mina para ser enviada a la siguiente etapa. La extracción del mineral se puede llevar a cabo mediante dos formas:

#### Extracción Rajo Abierto

Se extrae la roca desde la mina para ser enviada a la etapa siguiente de procesamiento o a botaderos.

Los principales subprocesos involucrados son:

- Perforación y tronadura de la roca
- Carguío y transporte de los materiales a sus destinos

➔ Carguío y transporte:

El Carguío y Transporte Minero corresponde al proceso encargado de transportar el mineral desde el rajo a los distintos puntos de entrada que alimentan las plantas de procesamiento, y por tanto cumplir con sus objetivos, esta etapa, es fundamental para mantener la continuidad operacional de la cadena productiva minera completa.

#### Extracción Subterránea

Se extrae la roca desde la mina para ser enviada a la etapa de procesamiento de mineral. La extracción subterránea se puede llevar a cabo mediante distintos métodos de explotación. Esta elección depende de aspectos técnicos – económicos, como característica de la roca o escala de la explotación.



Figura 2 Mina rajo abierto Codelco

Fuente: Codelco 2020



Figura 1 Mina subterránea Chuquicamata

Fuente: World Energy Trade, 2019

Los principales subprocessos involucrados son:

- Perforación y tronadura de la roca
- Carguío y transporte del mineral a la planta

2) Procesamiento: Es cuando se somete el mineral a varios procesos que tienen por finalidad aumentar su concentración para hacer posible su venta o prepararlo para el proceso de fundición y refinación.

Existe una gran diversidad de procedimientos metalúrgicos, dependiendo de las características del mineral. Los principales métodos son:

- Sulfuros (minerales profundos): Flotación
- Óxidos (minerales en superficie): Lixiviación

3) Proceso de Fundición: Consiste en la separación de los metales contenidos en los concentrados por un proceso pirometalúrgico, esto quiere decir que, con altas temperaturas se funde el concentrado, transformándolo de sólido a líquido, de este modo se obtienen metales en forma impura, con contenidos altos de metales.

4) Proceso de Refinación: Consiste en la obtención de los metales en un estado de pureza tal, que están aptos para su transformación industrial.

- Refinación a fuego
- Refinación por electro-obtención

(bnamericas, 2021)

### 3.2. Energía

La energía se define como la capacidad de realizar trabajo siendo inherente a todos los sistemas físicos, sus principios fundamentales se basan en la conversión, uso, almacenamiento y transferencia de energía.

Puede presentarse como energía potencial o como energía cinética, siendo estas dos formas interconvertibles, es decir, la energía potencial liberada se convierte en energía cinética, y ésta cuando se acumula se transforma en energía potencial. La energía no puede ser creada ni destruida, sólo transformada de una forma en otra (Conicet, 2020)

La energía proviene de diferentes fuentes las cuales se pueden distinguir las siguientes:

a. Renovables:

Se determina a fuentes de energía renovables (FER) como aquellas cuyo potencial es inagotable o indefinido, esto proviene de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua como consecuencia de radiación solar o de la atracción gravitatoria de otros planetas de nuestro sistema solar, es por esto por lo que las energías renovables son; la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz y la biomasa.

b. No Renovables:

Las fuentes de energía no renovable son aquellas que se presentan en una cantidad limitada en la naturaleza, es decir, que una vez que se terminan no se pueden reponer, tales como, el petróleo, el carbón y el gas, los cuales se produjeron a partir de los restos orgánicos de animales y plantas muy antiguos. Este, es un proceso natural que aún sigue sucediendo, pero se tarda demasiado tiempo como para considerarlo renovable.

**Tabla 1** Energías primarias y secundarias de origen

Fuente energética	Primaria	Secundaria
Petróleo crudo	X	
Biomasa/Leña	X	X
Carbón	X	X
Gas Natural	X	X
Hídrica	X	
Solar/Fotovoltaica	X	
eólica	X	
biogás	X	X
Geotermia	X	

Fuente: Elaboración propia

Hay que tener en cuenta que, a diferencia de las energías no renovables, las cuales provienen de combustibles fósiles, las energías renovables no producen gases de efecto invernadero, los cuales, son causantes del calentamiento global y por lo tanto del cambio climático, además de esto, no producen emisiones contaminantes, por lo que el hecho de priorizar el uso de las energías renovables por encima de las no renovables significa un beneficio importante para el medio ambiente. Cabe mencionar también que, en cuanto a

costos, las energías renovables tienen valores más bajos, mientras que los combustibles fósiles suben cada vez más de precio.

c. Renovables no convencionales (ERNC)

Se les denomina ERNC a las energías provenientes de fuentes consideradas “inagotables” y se le designa el no convencional porque no provienen del común de los recursos energéticos utilizados como lo son el carbón, petróleo y gas.

Ahora bien, en Chile existen las energías renovables no convencionales (ERNC) la cual son declarados según la ley n° 20.2571 como aquella energía eléctrica generada por medios de generación renovables no convencionales. se estipula que las ERNC se obtienen a partir de centrales hidroeléctricas pequeñas (> 20 MW de potencia máxima) y a proyectos que aprovechen la energía de biomasa, hidráulica, la geotérmica, la solar, la eólica, de los mares, biogás entre otras. (BCN, 2008)

3.2.1. Tipos de Tecnologías de producción energéticas

a. Hidráulica: La hidroelectricidad es la fuente de energía renovable más utilizada en el mundo, totalizando un 71% de la generación de energía renovable durante el 2016. A ese año contaba con una capacidad instalada de 1.064 GW, generando un 16,4% del total de electricidad en el mundo. (Vergara, 2021)

b. Solar: La energía solar corresponde a una energía renovable que utiliza la radiación electromagnética que proviene del sol. La cantidad de energía solar que incide por unidad de área y tiempo (kWh / m<sup>2</sup> al día) corresponde al principal criterio para seleccionar el lugar de ubicación de una planta solar. El norte de Chile posee la mayor incidencia solar del mundo, donde destacan el desierto de Atacama y zonas próximas.

c. Energía geotérmica: Corresponde a una fuente de energía renovable, que genera energía a través de la utilización del calor de las profundidades de la tierra, las plantas geotérmicas requieren altas temperaturas para poder funcionar, las que van desde los 150° hasta los 370° provenientes de recursos hidrotérmicos, es decir, vapor y agua.

d. Térmica: Proviene de las instalaciones cuya electricidad es producida a partir de combustibles fósiles, como lo son, el petróleo, el gas natural o combustible mixto, mediante un ciclo termodinámico de agua – vapor.

e. Bioenergía: Corresponde a la producción de electricidad a partir de la energía almacenada en materia orgánica. Esta materia prima puede provenir de residuos forestales y agrícolas, la producción de la bioenergía se realiza a través de un proceso termoquímico, el cual consiste en la combustión, gasificación o digestión anaeróbica de materia prima.

f. Eólica: La energía eólica es una energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. Se obtiene a través de aerogeneradores, o también llamados “molinos de viento” de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica, estos aerogeneradores pueden instalarse en suelo firme o suelo marino.

### 3.2.2. Efectos del uso de las Energías

La explotación de energías puede producir efectos secundarios, tales como; contaminación ambiental, visual, sonora, entre otras. Es de conocimiento mundial que el mundo entero está siendo afectado en gran medida por el efecto invernadero provocado por el uso de los combustibles fósiles. El uso indiscriminado de energías no renovables ha provocado que estas se vuelvan escasas, por lo que, oficialmente, se puede decir que el planeta se encuentra en una crisis energética mundial.

Dentro de las energías más contaminantes se encuentran los combustibles fósiles (usados actualmente en minería), los cuales son los mayores responsables del efecto invernadero que se presenta en el planeta; Son utilizados en el transporte, calefacción, generación de electricidad, entre otras, que representan las principales fuentes de CO<sub>2</sub> que salen a la atmosfera.

### 3.2.3. Almacenamiento

Es un proceso mediante el cual se guarda energía, ya sea electricidad u otra forma de energía, en un momento en el tiempo, con la finalidad de que esta pueda ser utilizada en otra ocasión. Un claro ejemplo de almacenamiento podría ser una pila recargable o la batería de un auto, ya que estos, almacenan energía la cual es aprovechada según sea requerido.

Los sistemas de almacenamiento han ganado mucha importancia en el sector eléctrico, ya que tienen el potencial de ser el complemento ideal para los recursos que abundan en Chile; la energía renovable, sobre todo, las energías renovables variables, como el sol, el viento, el agua o del mar.

### 3.2.4. Energía en los procesos mineros

La energía en los procesos mineros es considerada un insumo crítico sustancial para el desarrollo de las actividades. La energía eléctrica sustenta la planta de proceso y equipos eléctricos de una mina.

Por otra parte, el Petróleo y otros derivados de hidrocarburos para equipos móviles y procesos metalúrgicos (sonami, 2012)

### 3.3. Matriz Energética

Para profundizar en el consumo energético de Chile es necesario revisar la Matriz Energética la cual es una herramienta estadística que nos permite visualizar el gasto energético de un determinado sector. La matriz se divide en matriz primaria y matriz secundaria; En la matriz primaria podemos ver el consumo de energías provenientes de fuentes primarias las cuales son aquellas que se encuentran en su estado natural sin ser transformadas, estas provienen de combustibles fósiles, energía solar, eólica, geotérmica y cualquier otra forma de energía que pueda ser convertida; estas energías no pueden ser utilizadas directamente por el consumidor por lo que necesitan un proceso de transformación convirtiéndose en energías de fuentes secundarias como lo son la electricidad, biocombustibles, derivados del petróleo entre otros dando. El estudio del consumo de energías de fuentes o energías secundarias de un determinado sector corresponderá a la matriz energética secundaria. Cabe destacar que las energías secundarias no siempre requerirán de ser transformadas solo bastará que la energía sea de objeto final como lo es el gas natural y la biomasa.

La importancia de establecer la matriz energética es que ayuda a administrar la energía generada para así poder realizar los cálculos de distribución, estimar costos, innovaciones, logística de transporte etc. (Deloitte, 2016)

En la matriz energética primaria de Chile predominan los recursos fósiles con una representación del 68% del total, que corresponde a la suma de:

1. Petróleo crudo (30%),
2. Carbón mineral (22%)
3. Gas natural (16%).
4. Biomasa (23%)



5. Origen hídrico (5%)
6. Solar (2%)
7. Eólica (1%)

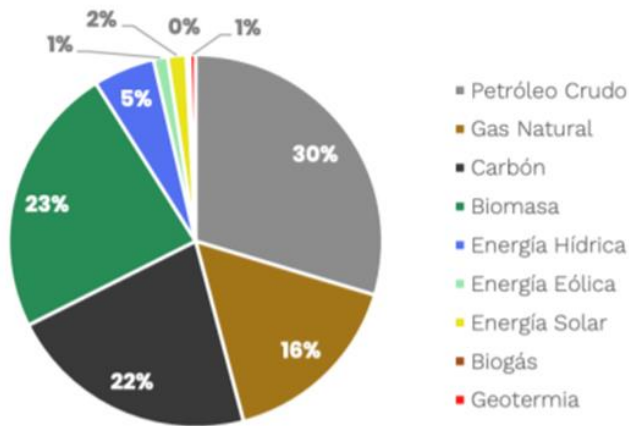


Figura 3 Matriz energética primaria de Chile año 2019, (BCN, 2021).

(Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021)

El consumo final está presentado por la matriz energética secundaria el cual demuestra para el año 2019 que el principal consumo es para:

1. Derivados del petróleo con un 58% del consumo energético total o final y
2. Electricidad con un 22%.

(Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021)

## Consumo Energético

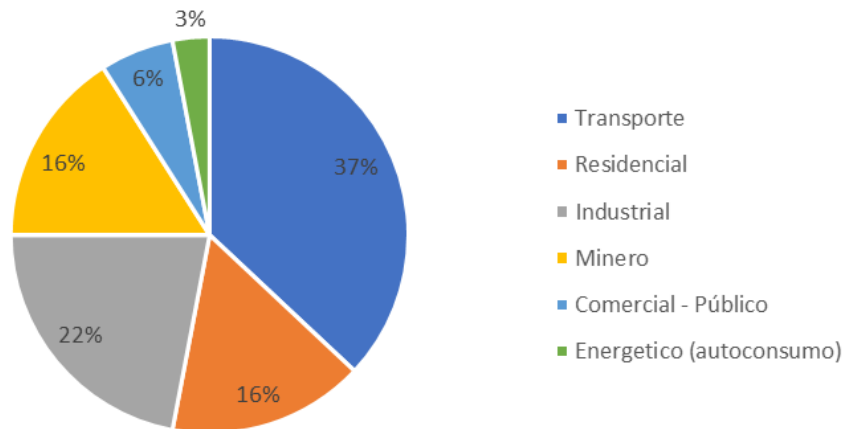


Figura 4 Consumo energético total de Chile por sector económico, año 2019, (BCN, 2021).

## Balance nacional de energía (BNE)

Es un informe estadístico realizado por el Ministerio de Energía el cual a través de una figura estadística proporciona información sobre la energía disponible en el país cuya unidad de medición son los Tera Calorías (Tcal). Este balance muestra tanto las energías de origen secundario y primario.

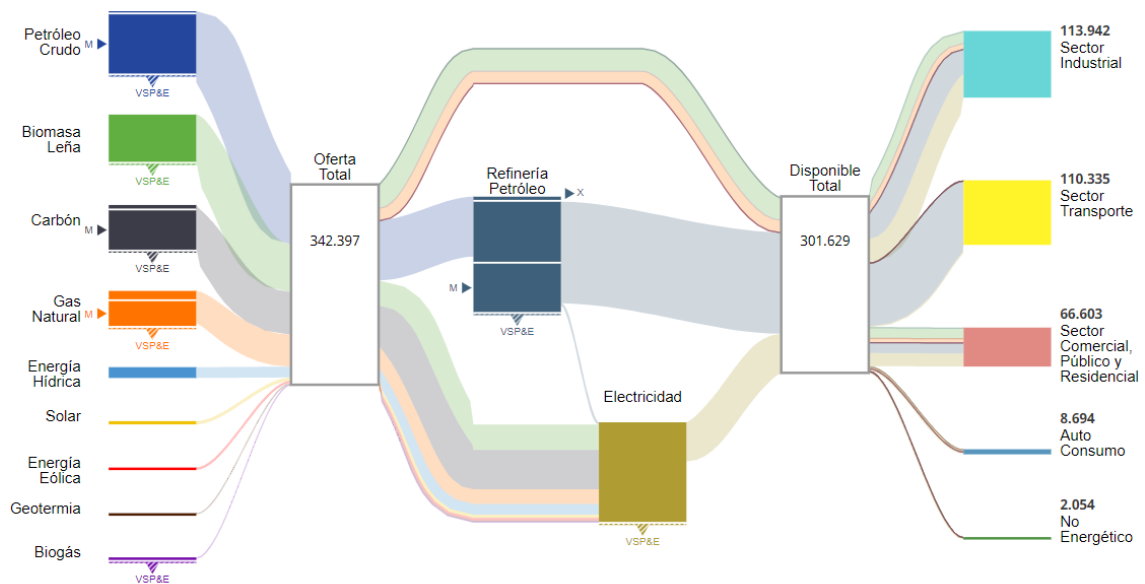


Figura 5 Balance energético 2019, fuente: Ministerio de Energía

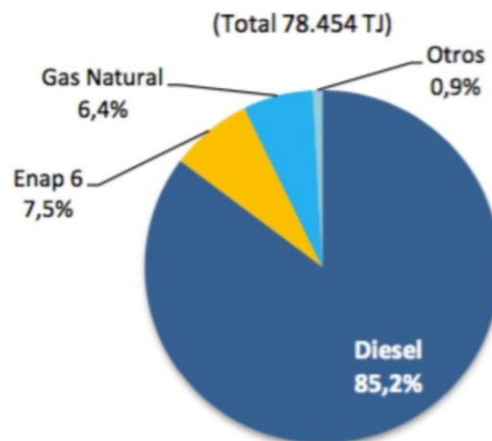
Balance Energía Primaria podemos apreciar la oferta disponible de energía desde su producción inicial sumando importaciones y descontando las exportaciones lo que corresponde a la producción en un periodo de un año para ser transformado en otras fuentes de energía o como consumo final. y en el Balance de Energía Secundario se puede apreciar la cantidad de energía disponible transformada y la cantidad de consumo de esta.

#### Consumo Energético en el Sector Minero

El sector minero en la actualidad es el responsable del 14% del gasto de energía en Chile, su consumo energético ha crecido un 33% más en la última década (Minería Chilena, 2020), esto se debe a varias razones, una de ellas se debe al ámbito estructural, ya que debido al envejecimiento de las minas existen menores leyes de mineral y las distancias de transporte o acarreo son más largas, por lo que el requerimiento energético ha aumentado (principalmente por consumo de combustibles). Las restricciones a extracción de agua y desalación también han sido causas del aumento de la demanda energética, ya que, debido a las restricciones a la extracción de agua continental, han provocado que las faenas instalen plantas de desalación e impulsión de agua marítima hacia las operaciones mineras, lo que significa un altísimo consumo de energía adicional.

Por otro parte el sector minería demanda un 33% de la electricidad y casi un 20% del diésel nacional, se espera que el consumo eléctrico aumenta en un 41,2% para el 2029 por la creciente demanda de cobre puesto que la proyección hacia el 2050 es de un 50% (beauchef mineria, 2021).

En la minería hay algunos combustibles más utilizados que otros, un claro ejemplo de esto es el Diesel, a continuación, se demuestra la distribución de la elección de combustibles utilizados en la minería del cobre.



*Figura 6 Distribución del consumo de combustibles en minería del cobre*

Fuente: Comisión chilena del cobre

### Emisiones de carbono de minería

Se entiende por Huella de carbono como la medición de la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos, ya sea directa o indirectamente por una persona, organización o determinado sector. Una de las formas de evidenciar el impacto de la minería en el medio ambiente es calculando la huella de carbono del sector minero.

La industria minera es responsable directa o indirectamente de parte importante de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en el país, principalmente por ser una industria de gran envergadura y por su alto consumo de energía eléctrica y Diesel. En minería, las etapas de concentración de minerales son las

que se llevan la mayor cantidad de consumo de energía eléctrica, por otra parte, en la operación minera y el transporte de materiales en camiones es donde ocurre la mayor cantidad de consumo de combustible.

La empresa Codelco, una de las principales industrias mineras del mundo en explotación de cobre tiene una huella de carbono de 1,5 y cerca de 7 toneladas de CO<sub>2</sub> (Codelco, 2011) por tonelada de cobre fino lo que es de impresionar ya que son cantidades enormes que producen que el calentamiento global sea una realidad difícil de revertir. En conclusión, el principal problema que existe hoy en día en el rubro minero es la emisión de gases de efecto invernadero y su gran aporte en la contribución como industria al calentamiento global.

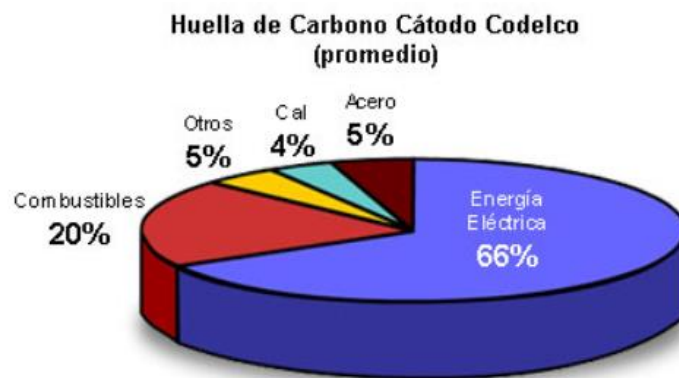


Figura 7 Huella de carbono cátodo del cobre

Fuente: Codelco, 2020

Como se mencionó anteriormente, la cantidad emisiones de gases de efecto invernadero por parte de la minería no es menor, es por esto, que en la actualidad diferentes empresas mineras, buscan nuevas fuentes de energía renovables que sean viables con los procesos mineros, en los últimos años se

ha puesto en la palestra el uso de hidrógeno verde como fuente de energía en minería.

## Hidrógeno

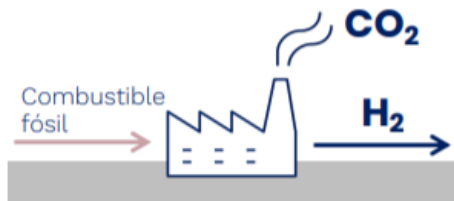
El hidrógeno es el elemento químico más abundante del mundo. Es ligero, almacenable, denso en energía y no genera en sí emisiones directas de contaminantes o gases de efecto invernadero.

En la actualidad, existen tecnologías que permiten la obtención de hidrógeno, pero no todas ellas son sostenibles. Es por esto, que para saber exactamente el impacto que tiene cada uno y las emisiones que generan se ha establecido un Código de color que los diferencia entre cuatro tipos:

*Tabla 2 Características de las fuentes energéticas basadas en hidrógeno*

<b>Tipo de Energía</b>	<b>Características</b>
Hidrógeno Gris	Se produce con combustibles fósiles. Genera importantes emisiones de CO <sub>2</sub>
Hidrógeno Azul	Se produce con combustibles fósiles con tecnologías de captura y almacenamiento de carbón. Es menos contaminante que el hidrógeno gris, esto quiere decir que reduce las emisiones de carbono, pero no las elimina.

Hidrógeno Turquesa	Se produce mediante pirólisis a partir de gas natural No está libre de emisiones, ya que sigue siendo un combustible fósil
Hidrógeno Verde	Es producido a partir de energía renovable. Es la más adecuada para una transición energética totalmente sostenible.



**Hidrógeno Gris**

re|Figura 8 Producción de H2 Gris



**Hidrógeno Verde**

Figura 9 Producción H2V

Fuente: Ministerio de medio ambiente.

## Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde o también llamado hidrógeno renovable, es el producto de la electrólisis del agua a partir de la electricidad proveniente de energías renovables, este es un proceso que transforma el agua en moléculas de gases de hidrógeno y oxígeno.

Unos de sus principales beneficios es que no emite CO<sub>2</sub>, el gas de efecto invernadero que emiten al quemarse la mayoría de los combustibles fósiles, ya

que no contiene carbono en su interior, si no que, simplemente genera otro compuesto conocido: agua

El H<sub>2</sub>V es una fuente inagotable de energía limpia y sustentable, la cual tiene la capacidad de impulsar industrias y hasta permitir la descarbonización del planeta, no es una energía en sí, sino que es un elemento que puede servir para almacenar, transportar y distribuir energía, es decir, es un “vector energético”

Junto con la aparición del hidrógeno verde, se han desarrollado nuevas aplicaciones, en las cuales, este elemento se quema de forma directa o genera electricidad a través de dispositivos llamados celdas de combustible con la combinación de hidrógeno y oxígeno del aire, un claro ejemplo de estas aplicaciones es; el transporte, almacenamiento y producción de energía eléctrica y térmica, entre otras.

A pesar de que el proceso de electrólisis tiene valores más elevados, es de suma importancia encontrar la manera de reducir dichos costos, ya que, la utilización de hidrógeno verde como combustible, significa un porcentaje sumamente alto en la reducción de emisiones. El hecho de que genere menos emisiones no lo hace menos eficiente, puesto que, una molécula de hidrógeno tiene alta densidad energética por unidad de masa, la cual es 3 veces más que la gasolina y 120 más que las baterías de hilo.

Debido a las ventajas que posee Chile al tener potenciales energías renovables, y considerando que se pretender reducir los costos del proceso químico “electrólisis”, estos factores podrían posicionar al país como uno de los productores de hidrógeno a menor costo, además de contribuir positivamente a factores como; cambio climático, oportunidades sociales, desarrollo económico, entre otros.



El uso del hidrógeno verde contribuye a mitigar los efectos del cambio climático, ya que, al obtenerse a partir de energías renovables, se está produciendo energía de forma segura, sostenible y no contaminante.

El hidrógeno verde puede ser implementado en varios sectores, entre ellos el sector minero.

El proceso de obtención de Hidrógeno Verde es un tanto complejo, puesto que, es necesario implementar nuevas tecnologías, las cuales se presentan con más detalle a continuación:

La Tecnología se define como el conjunto de conocimientos y técnicas que, aplicados de forma lógica y ordenada, permiten al ser humano modificar su entorno material o virtual para satisfacer sus necesidades, esto es, un proceso combinado de pensamiento y acción con la finalidad de crear soluciones útiles.

Las tecnologías que permiten la extracción de Hidrógeno verde son de última tecnología innovadora

### Electrólisis

Es un proceso mediante el cual se separan los elementos de un compuesto químico con la utilización de la corriente eléctrica. Se liberan electrones por los aniones en el ánodo, produciendo una oxidación, y se captan electrones por los cationes en el cátodo, produciendo una reducción. Es por esto que se determina como un proceso de Oxidación-Reducción.

Esta técnica es utilizada en diversos campos, sobre todo en la obtención de elementos y compuestos, por ejemplo, en el caso del hidrógeno, este puede ser obtenido por electrólisis y ser utilizado como combustibles.

Para formar hidrógeno verde se requiere de una solución alcalina (Electrólisis Alcalina) puesto que el H<sub>2</sub>O por sí solo no es un buen conductor de electricidad, los electrolitos incorporados al H<sub>2</sub>O permitirá que los iones libres como sales minerales queden disponibles como conductores eléctricos que hará que la reacción suceda.

#### Normativa involucrada

En cuanto a normas legales, aún no existe un marco regulatorio aplicable a la producción e implementación de Hidrógeno Verde, puesto que, son tecnologías nuevas que aún se encuentran en estudio y desarrollo.

- Organismos Reguladores:

- o Ministerio de Energía

Su principal objetivo es administrar el sector energético del país con la finalidad de hacerla asequible para todos los habitantes del país. su participación ministerial en la impulsión del hidrógeno verde ha sido proponer la “*Estrategia nacional de hidrógeno verde*” publicada en noviembre de 2020 propone una política pública para alcanzar las ambiciones nacionales respecto al Hidrógeno verde esto enfocado en lograr al 2050 la descarbonización del país.

- o Comisión Nacional de Energía

Su objetivo es monitorear y proyectar el funcionamiento actual y esperado del sector energético, y proponer al Ministerio de Energía las normas legales y reglamentarias que se requieran, en las materias de su competencia.

- o Ministerio del Medio Ambiente

Está encargado de elaborar, ejecutar y fiscalizar las políticas nacionales sobre medio ambiente y recursos naturales, promoviendo y estimulando las

actividades de preservación, protección, restauración y uso sostenible de los mismos.

- Superintendencia de electricidad y combustibles

Esta entidad tiene por misión vigilar la adecuada operación de los servicios de electricidad, gas y combustibles, en términos de su seguridad, calidad y precio.

- Servicio de Evaluación Ambiental

Su misión es resguardar el medio ambiente de manera responsable y eficiente, protegiendo siempre a la ciudadanía y los recursos naturales; además de asegurar el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos naturales y contribuir al desarrollo integral, social, económico y cultural de nuestro país.

- CORFO

Esta entidad está a cargo de apoyar el emprendimiento, la innovación y la competitividad en el país junto con fortalecer el capital humano y las capacidades tecnológicas.

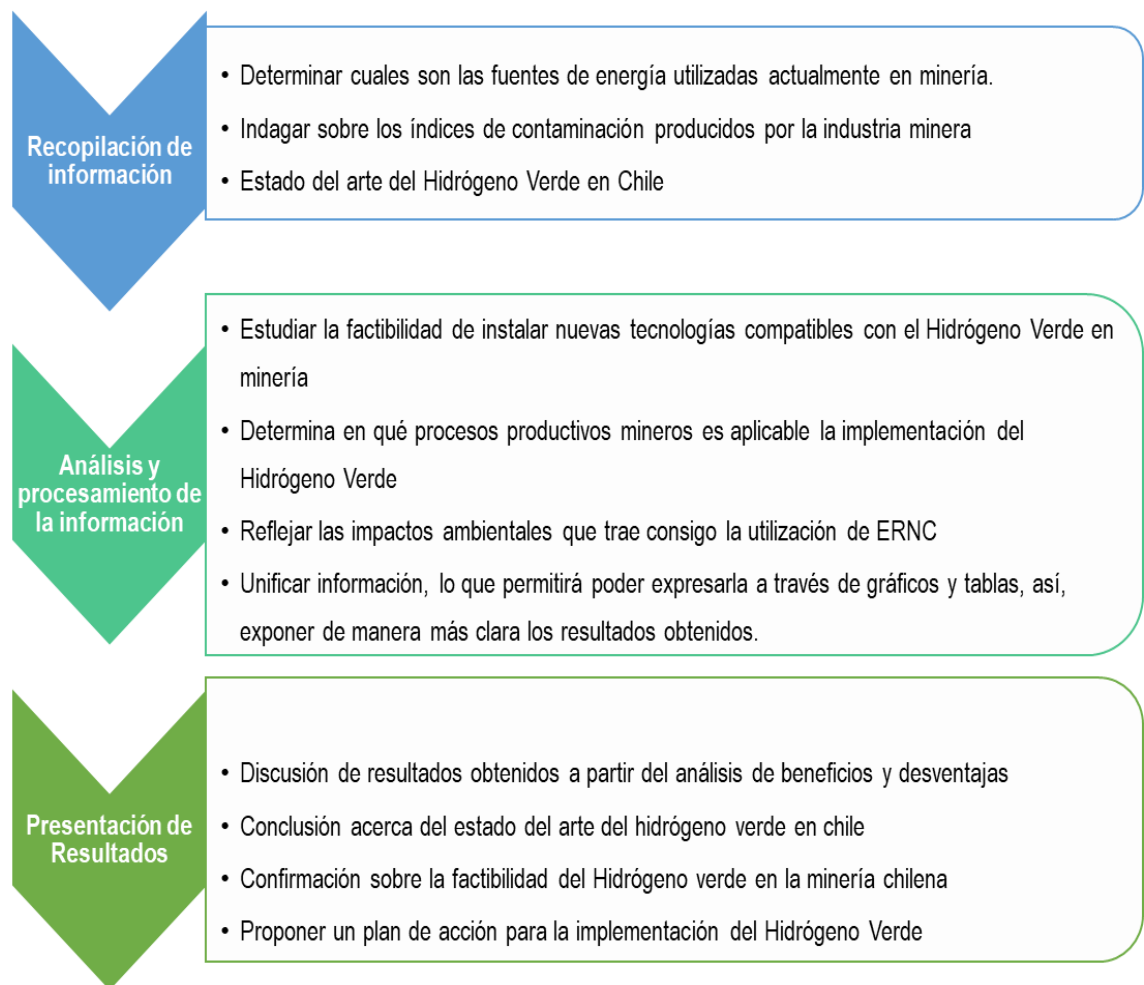
- Ministerio de Minería

Su misión es liderar el desarrollo de políticas públicas de minería orientadas a elevar la contribución de la actividad minera al desarrollo nacional, diversificando la actividad para aprovechar los recursos disponibles en condiciones sustentables y valoradas por la ciudadanía.

## 4. METODO DE INVESTIGACIÓN

Para un mejor desarrollo y entendimiento se ha decidido dividir la presente investigación en tres etapas, de esta forma se espera que el desarrollo de cada una de ellas sea más completo y ordenado.

El siguiente diagrama resume todo el diseño metodológico antes descrito:



*Figura 10 Método de investigación*

*Fuente: creación propia*

#### 4.1. Recopilación de información

1). Determinar cuáles son las fuentes de energía utilizadas actualmente en minería: Recopilación de datos sobre las fuentes energéticas que se emplean actualmente en la minería, en qué procesos son aplicadas e identificar tecnologías y métodos de obtención de energía.

2). Indagar sobre los índices de contaminación producidos por la industria minera: Se pretende reflejar los altos porcentajes de contaminación generados por la industria minera provocada por el uso excesivo de combustibles fósiles y energías no renovables.

3). Estado del arte del Hidrógeno Verde en Chile: En esta etapa se llevará a cabo un análisis de la información existente sobre el hidrógeno verde desde su hallazgo como energía sostenible hasta la aplicación en distintos procesos. También se pretende identificar la problemática existente que ha retrasado la utilización de hidrogeno verde en minería ya sea por costos, falta de información o accesibilidad, obtención del recurso, falta de información etc.

#### 4.2. Análisis y procesamiento de la información:

1). Estudiar la factibilidad de instalar nuevas tecnologías compatibles con el Hidrógeno Verde en minería: Analizar las condiciones idóneas de implementación del hidrógeno y evaluar su implementación a través de analizar costos e inversión del hidrógeno verde realizando una proyección de la implementación del H2V.

2). Determinar en qué procesos productivos mineros es aplicable la implementación del Hidrógeno Verde: Con el proceso minero ideal para la aplicación del hidrógeno verde se pueden desarrollar tecnologías, métodos e innovaciones que permitan cada vez ir facilitando el uso y así acortar las brechas existentes.

3). Reflejar los impactos ambientales que trae consigo la utilización de ERNC: Analizar el impacto que genera el uso de las ERNC como energía limpia para graficar el efecto positivo que el uso de esta energía permite aportar al desarrollo tanto económico como social y humano en general. analizar la mitigación que el aumento del uso de ERNC producirá al cambio climático.

#### 4.3. Presentación de resultados

1). Discusión de resultados obtenidos a partir del análisis de beneficios y desventajas: Se analizarán aquellos datos que se obtuvieron en la primera etapa de investigación, comparándolos entre ellos, para así, lograr llegar a datos certeros y concretos en cuanto a los beneficios o posibles desventajas que trae consigo la implementación del Hidrógeno Verde en el sector minero.

2). Confirmación sobre la factibilidad del Hidrógeno verde en la minería chilena: En base a los resultados obtenidos y el proceso investigativo realizado, se confirmará si es factible o no el uso de Hidrógeno Verde como ERNC en los procesos productivos presentes en la minería.

3). Proponer un plan de acción para la implementación del Hidrógeno Verde: Como punto final, se propondrá un plan de acción, el cual podrá ser adquirido por cualquier empresa para que guiarse en el proceso de implementación de Hidrógeno Verde y poder mejorar sus procesos productivos haciéndolos más competentes.

## 5. DESARROLLO

### 5.1. Que es el hidrógeno verde y cómo se produce

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, a lo largo del tiempo, este, ha sido obtenido a partir de combustibles fósiles, como; el carbón, el petróleo y el gas natural, para luego, ser utilizado en la refinación de combustibles fósiles, en la producción de amoníaco y en la industria del acero. Lógicamente estos procesos generan emisiones considerables de CO<sub>2</sub>.

El método más amigable con el medio ambiente es obtenerlo a través de energía solar y eólica, es por esto, que cuando se obtiene de esta manera es denominado “hidrógeno verde”.

El hidrógeno verde es producido a partir de agua y energías renovables, este se obtiene a través del proceso de electrólisis (utilizando energías renovables), donde se descompone la molécula de agua (H<sub>2</sub>O) en oxígeno (O<sub>2</sub>) e hidrógeno (H<sub>2</sub>).

Junto con la aparición del hidrógeno verde, se han desarrollado nuevas aplicaciones, en las cuales, este elemento se quema de forma directa o genera electricidad a través de dispositivos llamados celdas de combustible con la combinación de hidrógeno y oxígeno del aire, un claro ejemplo de estas aplicaciones es; el transporte, almacenamiento y producción de energía eléctrica y térmica, entre otras.

A pesar de que el proceso de electrólisis tiene valores más elevados, es de suma importancia encontrar la manera de reducir dichos costos, ya que, la utilización de hidrógeno verde como combustible, significa un porcentaje sumamente alto en la reducción de emisiones. El hecho de que genere menos emisiones no lo hace menos eficiente, puesto que, una molécula de hidrógeno



tiene alta densidad energética por unidad de masa, la cual es 3 veces más que la gasolina y 120 más que las baterías de hilo.

Debido a las ventajas que posee Chile al tener potenciales energías renovables, y considerando que se pretende reducir los costos del proceso químico “electrólisis”, estos factores podrían posicionar al país como uno de los productores de hidrógeno a menor costo, además de contribuir positivamente a factores como; cambio climático, oportunidades sociales, desarrollo económico, entre otros.

El uso del hidrógeno verde contribuye a mitigar los efectos del cambio climático, ya que, al obtenerse a partir de energías renovables, se está produciendo energía de forma segura, sostenible y no contaminante.

El hidrógeno verde puede ser implementado en varios sectores, entre ellos se pueden mencionar; el sector minero, el sector industrial, el sector agrícola y la exportación. (Chile, 2020)

#### 5.1.1. Electrólisis alcalina

Para formar hidrogeno verde se requiere de una solución alcalina puesto que el H<sub>2</sub>O por si solo no es un buen conductor de electricidad, los electrolitos incorporados al H<sub>2</sub>O permitirá que los iones libres como sales minerales queden disponibles como conductores eléctricos que hará que la reacción suceda.

Junto con la aparición del hidrógeno verde, se han desarrollado nuevas aplicaciones, en las cuales, este elemento se quema de forma directa o genera electricidad a través de dispositivos llamados celdas de combustible con la combinación de hidrógeno y oxígeno del aire, un claro ejemplo de estas aplicaciones es; el transporte, almacenamiento y producción de energía eléctrica y térmica, entre otras.

A pesar de que el proceso de electrólisis tiene valores más elevados, es de suma importancia encontrar la manera de reducir dichos costos, ya que, la utilización de hidrógeno verde como combustible, significa un porcentaje sumamente alto en la reducción de emisiones. El hecho de que genere menos emisiones no lo hace menos eficiente, puesto que, una molécula de hidrógeno tiene alta densidad energética por unidad de masa, la cual es 3 veces más que la gasolina y 120 más que las baterías de Litio. (Fundación de Chile, s.f.)

Debido a las ventajas que posee Chile al tener potenciales energías renovables, y considerando que se pretende reducir los costos del proceso químico “electrólisis”, estos factores podrían posicionar al país como uno de los productores de hidrógeno a menor costo, además de contribuir positivamente a factores como; cambio climático, oportunidades sociales, desarrollo económico, entre otros.

El uso del hidrógeno verde contribuye a mitigar los efectos del cambio climático, ya que, al obtenerse a partir de energías renovables, se está produciendo energía de forma segura, sostenible y no contaminante.

El hidrógeno verde puede ser implementado en varios sectores, entre ellos se pueden mencionar; el sector minero, el sector industrial, el sector agrícola y la exportación.

## 5.2. Aplicaciones del hidrógeno verde

Las aplicaciones del hidrógeno verde en una mina son variadas ya que estos pueden ser utilizados de distinta forma ya sea como combustible para la movilidad o como almacenamiento de energía eléctrica para el suministro de energía a las instalaciones mineras.

Si en un primer lugar se deseara incorporar al H<sub>2</sub> verde como combustible para maquinarias en faenas subterráneas tal como lo expresa la edición de “H<sub>2</sub>

verde como vector energético de la Universidad Autónoma de Chile” señala que “Chile tiene un potencial enorme el uso de hidrógeno como combustible en maquinaria minera subterránea, debido a los ahorros de energía eléctrica asociados a la ventilación, al no existir emisiones de gases de efecto invernadero en el interior de la mina y a la reducción, e incluso la eliminación de túneles relacionados con el servicio de ventilación de la mina.”

Eliminaría la dependencia de los combustibles fósiles

Es necesario pensar en una estrategia que permita que la energía generada a partir del potencial eólico o solar, principalmente, puedan ser absorbidas por las redes eléctricas o puedan ser utilizadas con las transformaciones necesarias como combustible para el sector movilidad y para el sector residencial, así como materia prima para la industria química, ya que resulta un desperdicio de energía y pérdidas económicas importantes para los inversores de FE.

### 5.3. Beneficios del uso del hidrógeno verde como energía renovable.

Uno de los principales beneficios a los que apunta el Hidrógeno Verde es minimizar la huella de carbono, puesto que, puede ser utilizado como combustible, reemplazando así a los combustibles fósiles que han sido utilizados desde el inicio de la industria minera, esto quiere decir, que el Hidrógeno Verde podría ser el soporte fundamental para lograr la des carbonización de la matriz energética, no solo a nivel nacional, si no que, a lo largo de todo el mundo.

Chile, posee una importante ventaja en comparación con los demás países del mundo, ya que, tiene un potencial desarrollo en la industria de energías renovables, sobre todo en la solar, eólica y fotovoltaica, esto le permitirá llegar a ser un líder mundial en producción y exportación de hidrógeno verde.

En relación con la energía solar, destaca la región del Desierto de Atacama, puesto que, tiene registros de radiación solar más altos del mundo, por otro lado, cuando hablamos de energía eólica, predomina la Región de Magallanes con los vientos más constantes del planeta.

Es sumamente importante que los costos invertidos en energías renovables sigan siendo reducidos, ya que la producción del hidrógeno verde depende entre un 50% y 80% de dichas energías, y es que, el factor económico también es un gran predominante al momento de la toma de decisiones en una industria, si se logra reducir el costo final de la producción del hidrógeno verde, este será escogido e implementado, dejando atrás a los combustibles fósiles en la actividad minera.

Para Chile, el Hidrógeno Verde podría llegar a ser tan importante como lo es el cobre, convirtiéndolo en un recurso estratégico para el desarrollo económico del país, puesto que este, podría jugar un rol fundamental para el cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones, los objetivos climáticos al 2030 y las metas de carbono neutralidad al 2050, todo esto con el fin de llevar a cabo un desarrollo sostenible y dar cumplimiento a las obligaciones adquiridas en su Contribución determinada a nivel Nacional. Se estima que la implementación del Hidrógeno Verde podría mitigar el 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Existen sectores industriales, donde se ha vuelto más difícil reducir emisiones y un claro ejemplo de ello es la industria minera, es por esto, que el Hidrógeno Verde significa una gran ventaja, que debe ser puesta en marcha de la forma correcta, para así lograr obtener todos los beneficios que esta nueva tecnología trae consigo, es decir, que el Hidrógeno Verde podría ser la clave para que la industria minera trabaje de forma consciente con el medio ambiente.

viabilidad de la implementación del hidrógeno verde en minería

#### 5.4. En qué procesos mineros es viable

En los últimos años, para la minería se ha vuelto cada vez más interesante el uso de energías renovables para la sostenibilidad de sus operaciones, puesto que, el alto consumo energético del sector ha terminado por reducir su competitividad.

La Comisión Chilena de Cobre plantea que; la demanda eléctrica en el sector minero aumentará en un 34% durante la próxima década, contemplando un número aproximado de 33,4 TWh, es decir, considerando los 25 TWh que se utilizan actualmente, el aumento en el uso de energía eléctrica será considerable.

Es importante mencionar, que, dentro de estas cifras, uno de los principales responsables del consumo energético, son los camiones, es decir, el transporte. Basándose en cifras emitidas por el Ministerio de Minería y de Energía se ha establecido que dichos camiones, son los responsables del 45% del consumo energético en la industria minera, además de esto, cabe mencionar, que generan 7.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

En minería, son utilizados más de 1.500 camiones de acarreo y cada uno de ellos consume aproximadamente 3.600 litros de Diesel al día, esto significa que, la implementación del hidrógeno verde en camiones mineros podría hacer que la industria se vuelva más ecológica y, por ende, también más competitiva.

##### 5.4.1. Implementación en camiones

El combustible utilizado para los camiones representa uno de los mayores gastos de una explotación minera. y su consumo promedio es de 350 litros diésel por hora.

Uno de los objetivos de la implementación del H2 verde en minería es el reemplazar camiones de minería mediana que utilizan Diesel a movilidad eléctrica alimentados por hidrógeno verde.

Si bien existen vehículos que requieren entre 100 a 400 KW estos pueden llegar a ser 100% eléctricos y pueden funcionar con baterías o estar conectados a la red eléctrica por medio de “cordón umbilical” con una autonomía de entre 3-4 horas de trabajos si bien es un comienzo se espera lograr duplicar esas horas con el avance de la tecnología.

El Hidrógeno Verde puede ser implementado, a través de distintas formas, una de ellas consiste en una transformación en el motor, la cual consiste en hacer que la combustión sea dual Hidrógeno/Diesel, es decir, un motor híbrido.

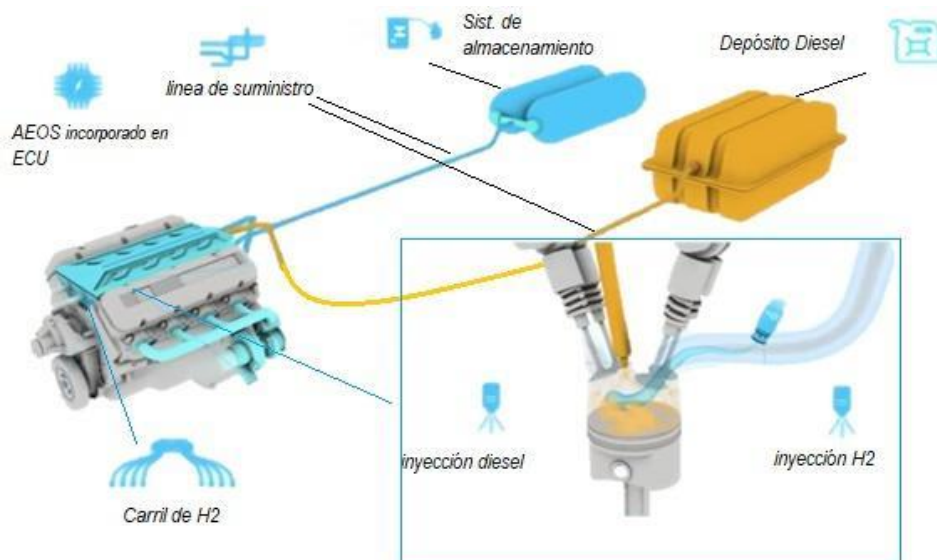


Figura 11 Estructura motora dual Hidrogeno Verde /Diesel

(Reporte Minero, 2021)

El motor dual, lo que se hace es inyectar hidrógeno a la mezcla, para que entre en la cámara de combustión. Es importante mencionar que, el hidrógeno tiene una velocidad de propagación que es 10 veces más alta que el Diesel, lo que permite que la combustión sea más inmediata (más rápida), además, se

alcanzan mayores temperaturas, ya que el hidrógeno eleva la temperatura 300° más aproximadamente.

Esta tecnología trae consigo los siguientes beneficios:

- Mejora la eficiencia del motor
- No se requieren grandes modificaciones para reacondicionar el motor
- Reduce contaminantes
- Alcanza rango de potencia útil requerida

Otra forma de hacer uso de Hidrógeno Verde es utilizar vehículos 100% eléctricos que tengan celdas de combustible a hidrógeno.

El conjunto de celdas puestas en serie forma una pila de combustible la cual son dispositivos electroquímicos similares a las baterías que producen electricidad a partir del uso del Hidrógeno como combustible y del oxígeno presente en el aire como oxidante. Producen la generación de electricidad, agua y calor.

Su principal característica es que las celdas de combustibles generan energía limpia, en forma silenciosa y eficiente. El ahorro en mantención es muy bajo ya que en comparación con un motor de combustión de gasolina este dispositivo tiene menor cantidad de partes y piezas. Se requiere un control de la temperatura, humedad y presión para un óptimo funcionamiento.



*Figura 12 Celda de combustible*

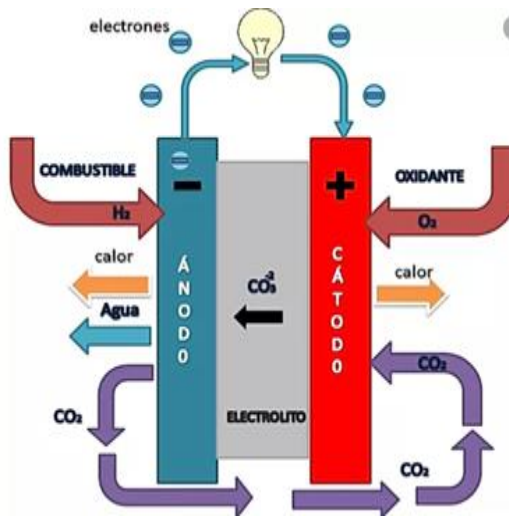


Figura 13 Intercambio químico electrólisis

#### 5.4.2. Abastecimiento eléctrico en instalaciones y telecomunicaciones mineras

El H<sub>2</sub> es uno de los elementos que más guarda energía eléctrica en sus enlaces por lo que no solo sirve para abastecer al transporte, sino que también, puede ser suministrado a la red eléctrica para grandes consumidores, como la minería, es decir, puede ser utilizado como recurso energético para las instalaciones tales como; casino, centro de comunicación, iluminaría, habitación y demás espacios físicos que requieren de electricidad dentro de una mina.

Para suministrar H<sub>2</sub> verde a las instalaciones de una mina se deberá implementar por medio de la red de transmisión eléctrica o ya sea con el afán de disminuir la huella de carbono de la mina contar con el almacenamiento en contenedores de hidrógeno. para ello se debe contar con el equipo electrógeno



idóneo que permita la conversión de este gas en electricidad para el sustento de las independencias de la mina.

Las aplicaciones estacionarias consideran cualquier aplicación en la cual las celdas son operadas en una locación fija para energía primaria, energía de respaldo o electricidad y calor.

La incorporación de este nuevo suministro eléctrico a una mina deberá contar con planos y registros actualizados de todos los equipamientos para la adaptación de esta nueva tecnología. Así mismo como contar con los registros de las potencias instaladas, consumos y distribución de la energía por áreas o centros de operación.

(sonami, 2012)

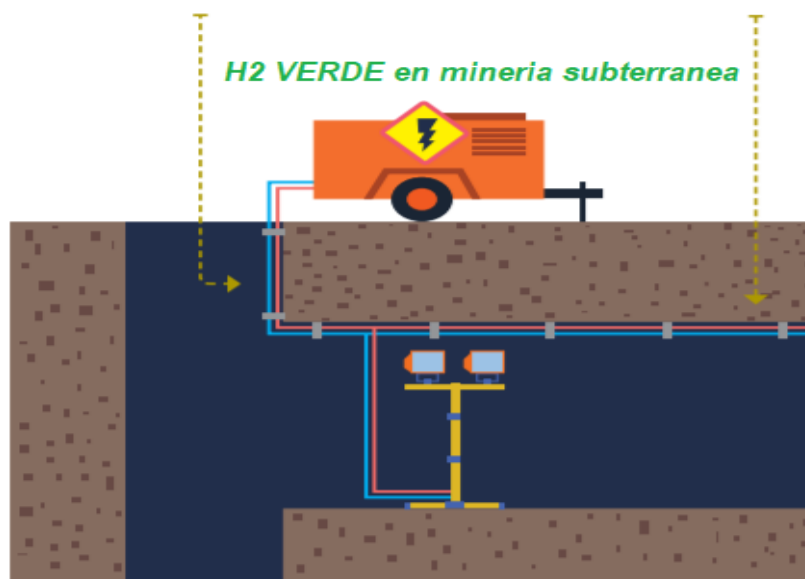


Figura 14 Minería subterránea aplicación de H2V para las instalaciones

### 5.5. Costos de la generación de hidrógeno verde

Los costos de la producción de Hidrógeno en Chile son notablemente más bajos que la mayoría de los países, esto se debe principalmente, a la energía

solar, en el país, la potencia eléctrica total instalada, con todo tipo de energía, es de 25 GW; la energía que se podría obtener con la energía solar es de 2.000GW, esto quiere decir que, Chile podría hasta llegar a ser un exportador.

Actualmente el hidrógeno verde aún no es rentable, puesto que su costo de producción es de aproximadamente 8 dólares por kilo, se calcula que, podría llegar a ser competitivo una vez que alcance los 2,5 dólares por kilo. A pesar de su costo de producción actual, todo indicaría que estos valores seguirán bajando, una vez que aumente la competencia y la demanda.

En resumen, Chile, es uno de los países que posee el costo de producción de Hidrógeno Verde más barato en el mundo, gracias a su campo ilimitado de radiación solar que es el desierto de Atacama y a los vientos garantizados del extremo sur, todo apuntaría a que, el país está destinado a fabricar Hidrógeno Verde. (www.educacionprofesional.ing.uc.cl, 2021)

El hidrógeno producido con electricidad renovable podría competir en costos, con alternativas de combustibles fósiles, como el Diesel, para el año 2030, esto podría ser posible considerando dos factores relevantes; costos decrecientes para la energía solar y eólica, junto con un mejor desempeño y economías de escala para los electrolizadores. (www.educacionprofesional.ing.uc.cl, 2021)

#### 5.5.1. ¿Por qué es costoso producir Hidrógeno Verde?

Es claro que, para la obtención de Hidrógeno Verde, es necesario llevar a cabo un método electroquímico llamado electrólisis, proceso que permite conseguir H<sub>2</sub> libre de combustible 100% sostenible.

El problema actual, es la dificultad de obtener grandes volúmenes de Hidrógeno Verde, por ser un proceso complicado y costoso. (sgk planet, 2020)

## 5.6. Proyectos y empresas involucradas

Actualmente en Chile, se están llevando a cabo proyectos de Hidrógeno Verde en la industria minera nacional, iniciativas que son apoyadas firmemente por el Ministerio de Minería, puesto que estas, representan uno de los vectores energéticos más prometedores del futuro, ya que el éxito de la implementación del Hidrógeno Verde en la minería podría posicionar al país como líder mundial en la industria con un desarrollo sostenible.

### 5.6.1. Primer generador de hidrogeno verde del país

Este proyecto está encabezado por Anglo American, compañía minera líder a nivel mundial la cual tiene sede ubicada en Londres. Esta empresa puso en marcha el primer generador de hidrógeno verde del país, el cual energiza una grúa en la mina de cobre Los Bronces ubicada en la Región Metropolitana de Santiago, esta debe cargarse durante 3 horas para operar durante 10 horas.

El generador producirá 2kg/día de hidrógeno verde mediante la reutilización del agua de la mina y la generación solar de la planta Las Tórtolas.

La empresa señala que una grúa convencional Diesel podría producir hasta 57 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, mientras que una grúa de hidrógeno verde es neutral en carbono.

### 5.6.2. Proyecto HyEx

Propuesto por la energética francesa Engie y el fabricante de explosivos Enaex, empresas que ya presentaron declaraciones de impacto ambiental para el proyecto.

Enaex dio a conocer su parte del proyecto, valorada en US\$49 millones y destinada a la síntesis de amoníaco verde para producción de nitrato de amonio, empleado en tronaduras. Enaex apunta a producir 18.000 toneladas anuales utilizando hidrógeno verde y aire.

El hidrógeno verde provendrá del componente de Engie del proyecto, el cual está valorado en US\$47 millones, este, utilizará agua de la central térmica Tocopilla en Antofagasta para suministrar hidrógeno de forma continua. Se calcula que la construcción debiera comenzar el año 2024 y generar hasta 154 puestos de trabajo, mientras que la parte de Enaex daría lugar a 101 puestos de trabajo.

Al igual que los proyectos mencionados anteriormente, hay otros tres que se encuentran en marcha, los cuales son apoyados por la Corporación de Fomento de la Producción más conocida como CORFO.

### 5.6.3. ALSET GLOBAL

La empresa austriaca Alset Global reportó en marzo de este año un avance de 90% en un prototipo para convertir a hidrógeno camiones de acarreo a Diesel, estimando que las pruebas reales en faena serán a fin de año.

Este proyecto en general está avanzado un 50% y indican que; en términos de reemplazo de Diesel por Hidrógeno en una faena minera, el desarrollo del motor, que corresponde a la parte más fundamental de todo el proceso de desarrollo está avanzado en más de un 90%. Actualmente están focalizados en tener el piloto listo para fin de año, para así, comenzar a realizar demostraciones en condiciones de operación reales en mina.

Alset Global postula que; para llevar a cabo este tipo de proyecto, es necesario contar con tecnologías que permitan niveles de confiabilidad igual o superior a los niveles de confiabilidad operacional existentes hoy en día en base a Diesel, ya que esta es la característica principal que tiene la combustión dual, que con niveles de confiabilidad superior a los niveles de confiabilidad con Diesel permite lograr reducciones de emisiones del orden del 70% dependiendo la faena minera en una primera etapa, y en una segunda etapa puede llegar hasta

un 100%, tanto en camiones nuevos como en la adaptación de las flotas existentes.

## Plan reducción emisiones CO<sub>2</sub> camiones mineros

En base a combustión dual Alset

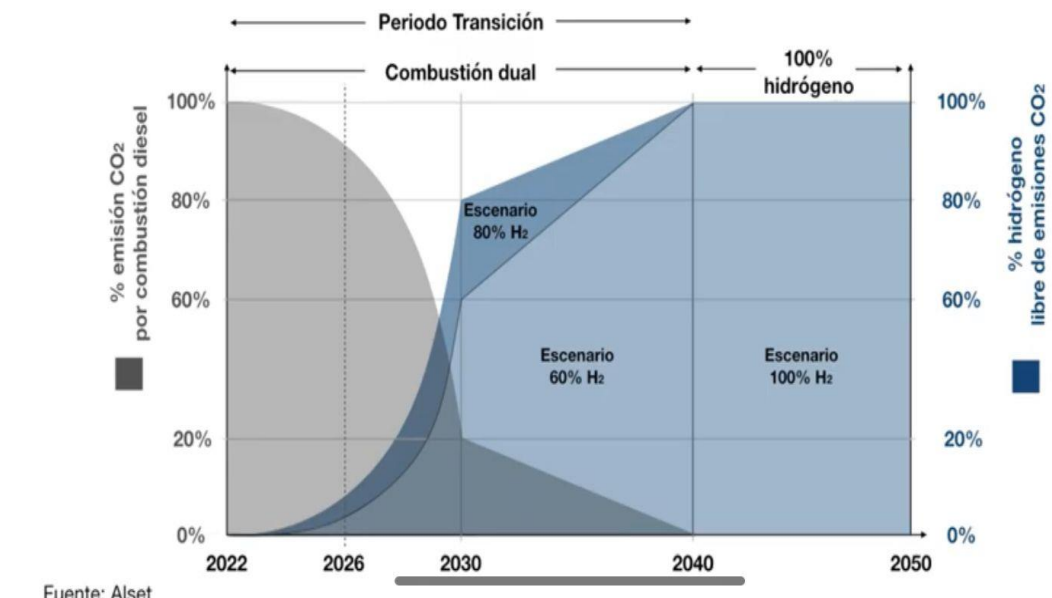


Figura 15 Plan de reducciones Alset Global

Fuente:

### 5.6.4. CSIRO, ENGIE Y MINING3

La agencia de investigación del Gobierno Australiano CSIRO, en conjunto con el centro de investigación minera Mining3 y Engie continúan trabajando en la validación del modelo de negocios para un prototipo de motor híbrido (Proyecto HYDRA).

Engie ha iniciado varios estudios donde comparan el actual camión a Diesel con la solución a Hidrógeno, y en cuanto a gastos, considerando todos los costos

asociados al camión, pronostican reducciones de alrededor de un 5% al año 2025 y de un 20% al 2030.

(bnamericas, 2021)

La empresa indica que desde el punto de vista financiero, para que los proyectos sean llevados a cabo con la implementación de hidrógeno renovable necesitan altas inversiones de CAPEX (inversiones de capital que crean beneficios) , tanto para la producción de energía renovable, la producción de hidrógeno y el uso de hidrógeno en la solución final, por lo tanto, se convierte en un desafío también para los inversionistas, ya que, no hay muchas referencias de proyectos de hidrógeno, por ende, ven un mayor riesgo.

#### 5.6.5. Universidad Técnico Federico Santa María, *Ballard Power Systems Inc*, *cnh2*, entre otros

La Universidad Técnica Federico Santa María de Chile, la canadiense Ballard Power Systems Inc. y el español Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2), entre otros. Llevan a cabo un proyecto que apunta a propulsar camiones en minas subterráneas mediante hidrógeno verde a partir de 2022.

En cuanto a la Asociación Chilena de Hidrógeno apuesta a un mayor alcance y reducción de costos en el corto plazo e indica que la madurez de la tecnología podría llegar el año 2030, su penetración durará alrededor de 10 años (hasta el 2040). (bbc, 2021)

Cabe destacar que los ministerios de Minería y Energía y el servicio geológico y minero Sernageomin prepararon una guía para presentar pilotos a fin de agilizar su aprobación y desarrollo de dichos proyectos.

(bnamericas, 2021)

#### 5.6.6. Proyectos a nivel internacionales

A nivel mundial, hay más países que están llevando a cabo la implementación del Hidrógeno Verde, entre ellos están; Australia, Países Bajos, Alemania, China y Arabia Saudita.

Uno de los países que destaca, es Australia, el cual propone 5 megaproyectos en su territorio, esto gracias a que posee gran cantidad de recursos de energía renovable, entre las que podemos mencionar, las energías eólica y solar.

Uno de estos megaproyectos, está siendo llevado a cabo en Australia Occidental, el cual fue denominado *Asian Renewable Energy Hub*, el proyecto de US\$36.000 millones es el más grande del país y del mundo, este, propone la construcción de una serie de plantas con electrolizadores, con una capacidad total de 14 GW. Se prevé que esté listo para el año 2027 o 2028.

Los 4 megaproyectos restantes aún están en la fase inicial de planificación, pero pretenden sumar otros 13.1GW. de ser aprobados, dos de ellos serán llevados a cabo en Australia Occidental y los otros dos en Queensland.

En base a lo mencionado anteriormente, se puede establecer que la tecnología aún es incipiente y todavía falta por avanzar, pero las proyecciones son alentadoras, es por esto, que es crucial para las empresas que pretenden implementar el hidrógeno verde en sus proyectos, lograr encontrar inversionistas y demostrar confiabilidad.

#### 5.7. Acuerdo de reducción de emisiones

Empresas que se desempeñan en la minería del cobre y que son parte del Consejo Minero, representan el 97% de la producción de cobre a nivel nacional, estas compañías se han comprometido de manera voluntaria a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero , posicionándose como el primer sector productivo en asumir este tipo de compromiso medio ambiental, esto demuestra su interés por combatir el cambio climático y por dar cumplimiento a los objetivos que tiene Chile en carbono neutralidad (2050) y en reducción de emisiones (2030).

Este inédito compromiso se produjo a finales del año 2020, en resumen, se trata de un documento elaborado con la participación voluntaria de 13 empresas de la gran minería.

Dentro de las empresas comprometidas, se pueden mencionar BHP y Codelco, las cuales se comprometen a reducir sus emisiones en un 70% al año 2025 y 2030 respectivamente; por otra parte, Anglo American tiene un compromiso de Carbono Neutralidad al año 2040 (nivel global).

Con respecto a las metas individuales de cada compañía, estas son de distinto alcance, puesto que unas son a nivel local y otras a nivel global, como también, en algunos casos involucran reducciones en el nivel de emisiones y en otros casos es abordada la Carbono Neutralidad, cabe destacar que algunas de las metas son fijadas con objetivos a corto plazo y otras a plazos que se extienden por más tiempo. A pesar de que los puntos mencionados anteriormente pueden variar, los compromisos propuestos tienen un factor en común, y es que gran parte de las reducciones comprometidas están asociadas a contratos de suministro eléctrico con fuentes de energía renovables. (Consejo Minero, 2020)



### 5.7.1. ¿Por qué es importante reducir emisiones?

Se sabe que el exceso de emisiones de CO<sub>2</sub> es el principal causante del calentamiento de la atmósfera por efecto invernadero, y es que, existe una evidencia cada vez más sólida de que el cambio climático está ocurriendo, y es consecuencia de la acción humana sobre el planeta, como resultado de esto, hoy la temperatura global es mayor de lo que ha sido al menos en 125 mil años, el nivel del mar ha aumentado aproximadamente 20 cm desde el año 1900, lo que provoca mayores precipitaciones (más intensas), mayor frecuencia de huracanes, inundaciones y tormentas tropicales, olas de calor, sequías, y con esto, afectaciones directas a la población humana, como por ejemplo; incendios, los cuales han sido devastadores en algunos lugares, cabe destacar que, se espera que a finales de este siglo la temperatura global aumente más de 4 grados centígrados, es por estas y muchas otras razones, que es de suma urgencia actuar de manera inmediata, puesto que, es crucial reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular, las de dióxido de carbono, por tanto, se deben reducir los consumos energéticos, o bien, realizarlos a través de fuentes de energías renovables.

(Minería chilena, 2021)

### 5.8. Beneficios y Desventajas de la implementación de Hidrógeno Verde

Los beneficios que trae consigo el Hidrógeno Verde cuando es utilizado como fuente de energía, en comparación con los combustibles convencionales como el Diesel son considerables, puesto que este, es capaz de guardar mucha energía y al mismo tiempo es sumamente liviano, pero aun así, su uso es igual o más seguro que otros combustibles.

Por otra parte, es importante mencionar que, la implementación del Hidrógeno Verde no contamina, solo produce vapor de agua, es decir, es una fuente de

energía limpia, además, requiere poca agua, ya que, con el 1% que usa hoy la minería chilena podría reemplazar todo su consumo de Diesel.

Esta nueva tecnología es una fuente de innovación, progreso y nuevos empleos, pero por sobre todas las cosas, el Hidrógeno Verde cumple un rol importantísimo en la lucha contra el calentamiento global.

Además de ser eficiente en el transporte de carga, ya que es un combustible más eficiente y liviano que el petróleo, también sirve para otros medios de transporte, como, por ejemplo; barcos y aviones.

Si la industria logra incorporar de manera efectiva el Hidrógeno Verde en sus procesos productivos, este podría ser el pilar para una recuperación económica sustentable.

Por otra parte, se puede considerar como desventaja en la implementación del Hidrógeno Verde, la dificultad de producción, puesto que, esta tiene valores muy elevados producirlo, a pesar de ser uno de los elementos más abundantes en la Tierra, el hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza hay que emplear un proceso fisicoquímico que permita su obtención. Se debe generar H<sub>2</sub>V a partir de sustancias que lo contengan, en este caso el agua, que debe ser sometida a electrólisis, para la descomposición de las moléculas de agua, en oxígeno e hidrógeno, este proceso, es bastante costoso, ya que se necesita mucha energía eléctrica. El desarrollo de nuevas tecnologías permitirá abaratar los costos de producción y hacer el hidrógeno verde más asequible para la presente generación. Es por las razones anteriores que, este factor será considerado como el único contra de esta iniciativa.

*Tabla 3 Ventajas y desventajas de la aplicación del H2V*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
100 % sostenible: el hidrógeno verde no emite gases contaminantes ni durante la combustión ni durante el proceso de producción.	Mayor coste: la energía procedente de fuentes renovables, claves para generar hidrógeno verde a través de la electrólisis, es más cara de generar, lo que a su vez encarece la obtención del hidrógeno.
Vuelve los procesos productivos competentes.	Posibles errores por falta de información sobre su implementación.
Su producción puede sostenerse mientras se disponga de fuentes de energía renovable.	Mayor gasto energético: la producción del hidrógeno verde en particular requiere más energía que otros combustibles.
Puede ser utilizado en todos los sectores que consumen energía y, como materia prima, en diversas industrias.	ES un elemento muy volátil e inflamable, por lo que requiere unos requisitos de seguridad elevados para evitar fugas y explosiones.
Ubicación geográfica privilegiada del país en cuanto a energías renovables, lo que facilita su producción.	
Es versátil, ya que, puede transformarse en electricidad o combustibles sintéticos y utilizarse con fines domésticos, comerciales, industriales o de movilidad.	
El hidrógeno es fácil de almacenar, lo que permite su utilización posterior en otros usos y en momentos distintos al de su producción.	

---

Ayudaría a implementar un modelo de desarrollo descentralizado.

(Guerra J. , 2021)

## 5.9. Seguridad y normativa

La minería es una de las principales actividades económicas del país la cual se encuentra en la historia de Chile desde el siglo XIX época donde las exportaciones de cobre fueron una contribución enorme para el desarrollo y el progreso del país. Si bien en aquella época la seguridad para los trabajadores era casi nula, hoy en día el concepto de seguridad es un elemento fundamental en la minería llegando así a convertirse en una de las industrias con mayores estándares de seguridad y una de las más seguras para trabajar, esto a pesar de la exposición a constantes riesgos.

Al querer incorporar el Hidrógeno Verde a procesos mineros se deben tener en cuenta las propiedades físicas y químicas del elemento a trabajar, si bien se sabe que no toda la materia se comporta igual, se pueden encontrar similitudes entre los elementos.

Cabe destacar que en la redacción de la normativa debe estar ligada a la acción contra el cambio climático y las metas propuestas por el gobierno chileno para alcanzar la des carbonización el cual impulsarán en este punto a determinar las estrategias necesarias para desarrollar una propuesta viable y que pueda ser aplicable en un determinado plazo.

Se analizarán estrategias internacionales para utilizar el hidrógeno verde de una manera segura, tomando en cuenta el entorno tanto social como medioambiental. (Guerra & Reyes-Bozo, 2019)

## 5.10. Hidrogeno verde en Chile

Desde el 2020 se ha estado realizando esfuerzos para promover e informar acerca de esta nueva alternativa como un freno al acelerado cambio climático. En noviembre de 2020 el ministerio de energía publicó “Estrategia Nacional de Hidrogeno Verde”; ahí se anuncia que desde el 2025 se comenzará a invertir en 5 GW, que es un 17,5% de la generación total de energía según la matriz energética nacional de 2019; metas de obtener el hidrógeno verde más barato y convertirse en un líder global de hidrógeno verde en 2030 con una producción de 25 GW son las ambiciones del gobierno. Junto con esta estrategia se crea la comisión de consejo nacional ministerial de hidrógeno verde.

Según las propiedades físicas del hidrógeno este debe ser considerado como sustancias peligrosas (gases inflamables) esto aplicado ya sea para el transporte, almacenamiento.

Los criterios para evaluar para definir la normativa en torno a la seguridad serán en torno a la producción, manejo y uso seguro del hidrógeno. La NASA utiliza hidrógeno para sus cápsulas espaciales, y también es utilizado actualmente en las máquinas de resonancia magnética, EE. UU. anualmente produce 9 millones de toneladas al año por lo que un correcto diseño de ingeniería permitiría un uso seguro de este combustible incluso aún mayor que los convencionales.

En este caso el uso de este elemento para el proceso minero sería para el carguío y transporte de minerales; otro proceso factible sería el suministro eléctrico de las instalaciones de operaciones.

El hidrógeno al ser considerado un combustible hay que tener en cuenta el triángulo del fuego: fuente de ignición, oxidante y combustible para así calcular los factores de seguridad. En comparación con otros combustibles el hidrógeno es muy similar a los convencionales llegando a ser incluso más seguro.

	Hidrógeno	Gas Natural	Propano	Vapor de Gasolina	Comentario
Densidad relativa respecto al aire	0,07	0,55	1,52	4	El hidrógeno es 14 veces más ligero que el aire
Temperatura de auto ignición	1.085°C	1.003°C	914°C	450°C	El hidrógeno y el gas natural tienen temperaturas de auto ignición similares y es 2 veces más alto que el vapor de la gasolina
Rango de inflamabilidad	75%	15%	10,1%	7,6%	El rango de inflamabilidad del hidrógeno es muy amplio, especialmente cuando el ratio hidrógeno-aire es 29%
Energía mínima de ignición	0,02 mJ	0,29 mJ	0,26 mJ	0,24 mJ	En condiciones óptimas de combustión, el hidrógeno puede encenderse con mínima energía (ej. una pequeña chispa)

Figura 16 Comparación de parámetros relevantes para la seguridad

Fuente: libro tecnologías H2 y perspectivas Chile, 2018

### 5.11 Medidas de control

El hidrógeno al ser el gas más liviano de la tabla periódica permite que este al haber una fuga este se disipe rápidamente a la atmósfera ya que este gas es 14 veces más ligero que la mezcla del aire, por lo que su riesgo de inflamabilidad es mínimo. No obstante, en lugares cerrados la acumulación y la combinación con oxígeno al llegar al punto límite superior de ignición se convertirá en una mezcla altamente inflamable. La recomendación en caso de escape de la contención de este gas es una rápida ventilación o dependiendo del caso, succión.

### 5.11.1. Manejo seguro del Hidrógeno

- identificación de riesgos potenciales en el sistema (averías, daños, deficiencias, piezas), entorno inmediato e indirecto de las instalaciones de la planta, y trabajadores que trabajen tanto directa como indirectamente con este combustible.
- Sistemas de seguridad que permitan detectar fallos en componentes y sistemas sobre fuga, una caída de presión, calor, frío o falla de energía.
- Análisis de las posibles consecuencias de fuga de gas en vehículos circunstancias como al momento de ir manejando, paso en túneles, puentes, estacionado en talleres etc.
- Mantenimiento de equipos, maquinarias, vehículos.
- Si lo amerita se puede contar con: dispositivos especiales de protección contra incendios o protección de aparatos eléctricos de explosiones y medición de concentración de gas.
- Capacitaciones al personal y búsqueda de personal idóneo para manipulación de este combustible. (GIZ, 2018)

### 5.11.2. Seguridad en vehículos

En la combustión interna de un motor el caso de mayor alerta sería la fuga del hidrógeno en estado gaseoso y la acumulación de este lo cual si supera su índice de límite de auto ignición este podría reaccionar con el oxígeno y presentar una rápida explosión.

No obstante, al ser el gas con el peso molecular más bajo aproximadamente de 1 u, hace que su volatilidad sea rápida y facilite la ventilación de este gas

convirtiéndolo en probablemente uno de los combustibles más seguros, en este caso más que la gasolina. Para que se genere una mezcla de hidrógeno explosiva debe haber una acumulación 18% aprox. de H<sub>2</sub>, en cambio la gasolina requiere una acumulación de 1,1% de vapor de gasolina. Por esto un vehículo a gasolina es mucho más riesgoso que un vehículo impulsado por hidrógeno.

Existen muchos prejuicios acerca de la utilización del hidrógeno sobre que es altamente inflamable sin embargo la velocidad de combustión del H<sub>2</sub> es tan alta que se quemaría rápidamente antes de llegar a daños significativos.

En minería la utilización de pilas de combustible en el transporte sería una mejora significativa debido a las grandes cantidades de Diesel que se ocupa en estos procesos. Las toneladas que mueven los camiones mineros capacitados con una potencia de 265 Kw pueden llevar cargas de 6.8 Toneladas por lo que sería un avance significativo para el uso de ERNC y las metas de des carbonizaciones existentes.

La llama de hidrógeno se quema muy rápidamente y debido a su baja densidad, la llama tiene una gran altura esto hace que el operario dentro del vehículo al momento de un incidente se halle a salvo de quemaduras producto de alguna avería de fuga. Esta llama es casi invisible por lo que la aplicación de medidas de control es necesaria. Ya sea colocar color a este gas y/o detector de fugas en el vehículo.

Hay que tener en cuenta el uso de este combustible en minas subterráneas ya que si bien el hidrógeno es evidentemente más seguro que el uso de gasolina esto es al aire libre.



La acumulación de este gas en recintos cerrados con poca oxigenación de pronto una bocanada de O podría generar una rápida explosión, por lo que se requieren medidas de seguridad diferentes en este caso que permitan la óptima ventilación del gas y son fácilmente alcanzables. (GIZ, 2018)

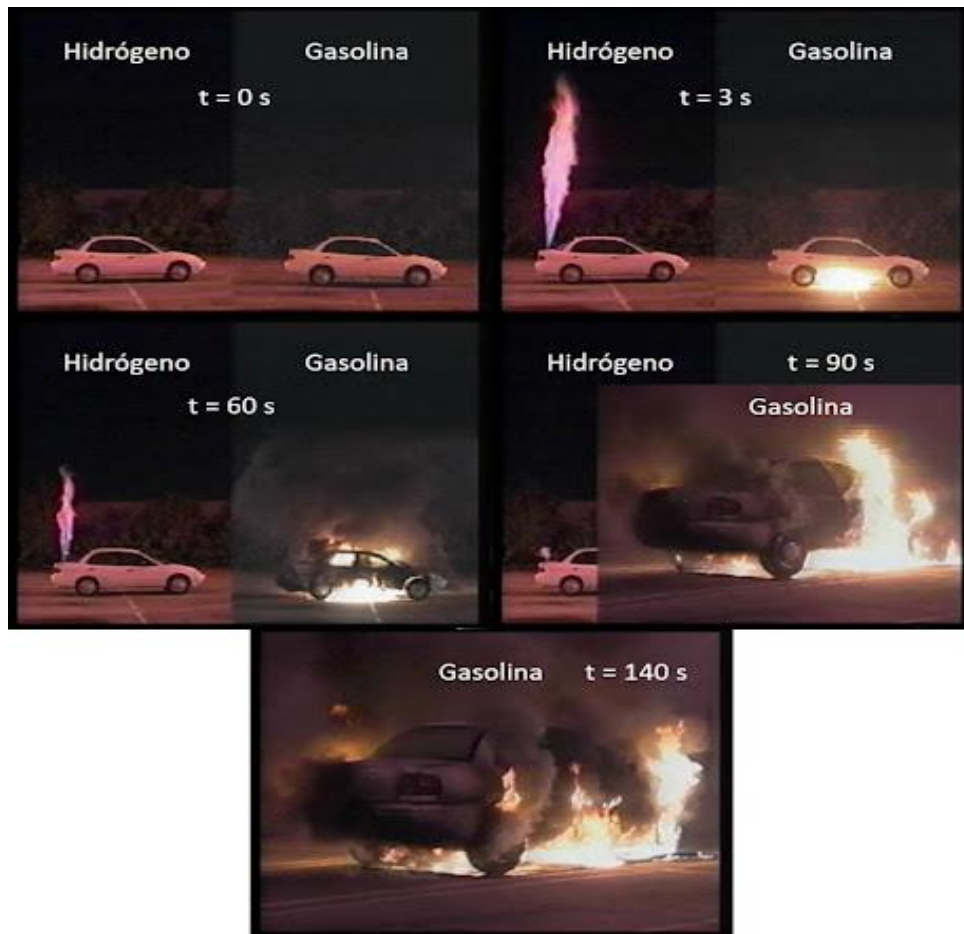


Figura 17 Hidrogeno vs Gasolina: fuga de combustible con incendio

Fuente: Diario Motor, 2009

#### 5.11.4. Almacenamiento de H<sub>2</sub>

3.000 litros de hidrógeno gaseoso contienen la misma cantidad de energía que un litro de gasolina, por lo que para que el H<sub>2</sub> se encuentre en las mismas proporciones de almacenamiento que combustibles como el diesel o la gasolina este debe ser comprimido en recipientes especiales para este gas, o si bien almacenarse en estado líquido; en este caso debería conservarse a una temperatura de -253°C; también puede ser conservado a 700 bar, 700 veces la presión atmosférica por lo que el almacenamiento de hidrógeno tiene altas demandas tecnológicas.

Los puntos críticos en poner mayor énfasis en el desarrollo de tecnologías son los puntos de contacto con el gas como lo serán los contenedores, tuberías, conexiones de llenado y válvulas<sup>1</sup> y todo aquel sistema que tenga relación con el suministro de

H<sub>2</sub> y su detección de fallas. Con el desarrollo de tecnologías se hace referencia a la selección del diseño en cuanto al material, resistencias y cálculos necesarios.

##### Almacenamiento de gas a presión

El almacenamiento de H<sub>2</sub> a presión es la más conocida. Puede ser almacenado de dos formas: depósitos de superficie móviles o estacionarios y en cavernas subterráneas [2]. Los cilindros que contienen hidrógeno suelen ser de acero que contienen a 200 atmósferas este gas. Si bien actualmente existen ensayos en cilindros de material de polímeros mucho más livianos que almacenan el gas a más de 350 atmósferas llegando a incluso a los 700 bar. cabe mencionar el inconveniente de los recursos que se requieren para comprimir este gas.

### Almacenamiento de hidrógeno líquido.

Llamado como LH2 es utilizado en la industria espacial y en el transporte, el hidrógeno en estado líquido tiene una temperatura de  $-253^{\circ}\text{C}$  por lo que su almacenamiento debe ser criogenizado y conservado a esta temperatura lo que hace que el uso de esta tecnología requiere de altos recursos.

1. El uso de tanques o estructuras sólidas
2. Inyección a redes de gas existentes
3. Almacenamiento bajo tierra
4. Almacenamiento químico.

#### 5.11.5. Discusiones con respecto a la seguridad

Con una regulación adecuada, los riesgos del hidrógeno son iguales o menores que los de combustibles convencionales; el riesgo depende más de la tecnología empleada que del combustible. No existe en Chile una normativa que abarque al Hidrogeno como combustible con el uso que se pretende dar, ya que, no hay experiencia en nuestro país sobre la utilización de este recurso.

#### 5.12. Propuesta de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno

Actualmente en Chile existe normativa que toca al hidrógeno de forma genérica. se es considerado como sustancia peligrosa ya que es un gas inflamable; El Ministerio de Salud reglamenta el almacenamiento de sustancias peligrosas por medio del decreto supremo N°43, sin embargo, en el mismo en el art. 3 anuncia que queda excluido del reglamento “los combustibles líquidos y gaseosos, utilizados como recursos energéticos, regulados por los decretos respectivos del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción”. Así mismo sucede con demás regulaciones del trabajo y en las distintas áreas donde

puede ser utilizado ese gas. Por lo anteriormente expuesto se debe redactar una nueva normativa que toque al h2 con las necesidades actuales y según el uso indicado que es el de combustible proveniente de ERNC; reglamentos detallados y específicos.

A continuación, se presenta el siguiente plan regulatorio realizado por el ministerio de energía el 2020[1], lo cual se podría decir que también es aplicable a minería a menos que SERNAGEOMIN redacte instrumentos jurídicos propios.

1. Reglamento general de instalaciones de hidrógeno combustible (2020-2024, Ministerio de Energía)
2. Reglamento de sistema de hidrógeno combustible en maquinaria y vehículos industriales (2020-2024, Ministerio de Energía)
3. Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas (DTO 43, actualización) (2025-2028, Ministerio de Salud)
4. Reglamento de transporte y distribución de hidrógeno por cañerías (2025-2028, Ministerio de Energía)
5. Reglamento de generadores eléctricos a hidrógeno y duales (2025-2028, Ministerio de Energía)
6. Reglamento de requisitos técnicos, constructivos y de seguridad para los vehículos a hidrógeno gaseoso (2025-2028, Ministerio de transporte y telecomunicaciones)

7. Manual de revisión técnica de vehículos a hidrógeno gaseoso (2025-2028, Ministerio de transporte y telecomunicaciones)
8. Reglamento de sistemas de hidrógeno para minería subterránea (2025-2028, Ministerio de Energía)
9. Reglamento de seguridad para tanques y contenedores para hidrógeno combustible (2029 - , Ministerio de Energía)
10. Recomendaciones de seguridad para las emergencias de vehículos a hidrógeno Líquido (2029 - Ministerio de transporte y telecomunicaciones)  
(Centro de energía UC, 2020)

### 5.13. Normativa internacional

Para realizar actualizaciones a la normativa existente y para la creación de nueva se deberá tomar apoyo a normativa internacional y reglamentos de la UE, de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) y del gobierno federal de EE. UU. En algunos casos no se encontraron normas aplicables, como por ejemplo uso del hidrógeno en minería subterránea.

La organización Internacional de Normalización (ISO) quienes trabajan en la estandarización de normas cuentan al menos con 3 normas referentes al hidrógeno y su uso:

- ISO 16111, Dispositivos de almacenamiento de gas transportables: hidrógeno absorbido en hidruro metálico reversible
- ISO 19880-8

- ISO 21087

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Restricciones

En base a lo visto anteriormente, se puede corroborar que al momento de implementar el hidrógeno verde como fuente de energía sustentable, si pueden existir restricciones o limitaciones, puesto que, para realizar los estudios correspondientes o un proyecto piloto, según corresponda, es necesario contar con un elevado capital de inversión, por esta misma razón, las empresas que actualmente son protagonistas de proyectos que involucran el uso de Hidrógeno Verde cuentan con el apoyo de inversionistas, que han decidido apoyarlos gracias a los niveles de confiabilidad que han logrado demostrar, es por esto que, es probable, que para las empresas de menor tamaño sea más complejo lograr incorporar la implementación de Hidrógeno Verde, sin embargo, este factor no las excluye de esta iniciativa.

Es importante mencionar que para la pequeña minería se vuelve más complejo poder acceder a las nuevas tecnologías, ya que estas significan un costo adicional en una etapa inicial.

Otro factor que puede ser predominante al momento de la incorporación de nuevas empresas a la iniciativa de implementación de hidrógeno verde, es la falta de información, ya que, este tema sigue siendo relativamente nuevo, por lo que, solo algunas empresas en Chile lo están llevando a cabo , y hasta el momento solo se ha alcanzado llegar a pruebas reales en faenas mineras , pero

no a la implementación de Hidrógeno como combustible en el 100% del proceso productivo, es decir, sigue siendo materia de estudio, esto hace que el proceso se vuelva más lento.

Se debe destacar, que independientemente de las diferentes restricciones o limitaciones que tenga una empresa minera para lograr incorporar estas nuevas tecnologías en sus procesos productivos, es de vital importancia invitarlas a participar de esta nueva era para la industria, ya que a pesar de que en la primera etapa se debe realizar una inversión, a largo plazo, los costos de producción se verán reducidos, se dará cumplimiento a las metas medio ambientales y además las empresas se volverán más competentes.

Las empresas pueden crear alianzas para apoyarse entre sí y de esta manera unificar sus esfuerzos, con el fin de incrementar y abaratar la producción de Hidrógeno Verde, para así, lograr llevar a cabo proyectos que incorporen al Hidrógeno como fuente de energía sustentable, también pueden recibir apoyo inversionistas interesados en el tema o de otras entidades que prestan ayuda a las empresas como por ejemplo CORFO, que apoya a las compañías con el objetivo de contribuir al desarrollo productivo sostenible, acelerando la implementación de iniciativas que aporten en la transición energética y en avanzar hacia la carbono neutralidad.

## 6.2. Criterios para Selección de Tecnología a utilizar

La selección de la tecnología que debe ser utilizada en un proyecto de implementación de Hidrógeno Verde en minería, dependerá de varios factores tales como su obtención, almacenamiento, distribución y procedimientos de

manejo del H<sub>2</sub> verde como combustible, y esto dependerá de la demanda de los recursos que se necesiten.

Antes que todo, es importante, que toda compañía que pretenda incorporar la implementación de Hidrógeno Verde como energía sustentable en sus procesos establezca si lo producirán de manera propia o si lo comprarán a empresas que posean generadores de hidrógeno, lo cual dependerá de criterios como; costos, viabilidad, gestión, etc. Una vez decidido esto, se pueden comenzar a analizar los tipos de tecnología, para así decidir cuál se adecua mejor a la empresa en cuestión, y es que, hay aspectos que deben ser considerados a la hora de seleccionar la tecnología.

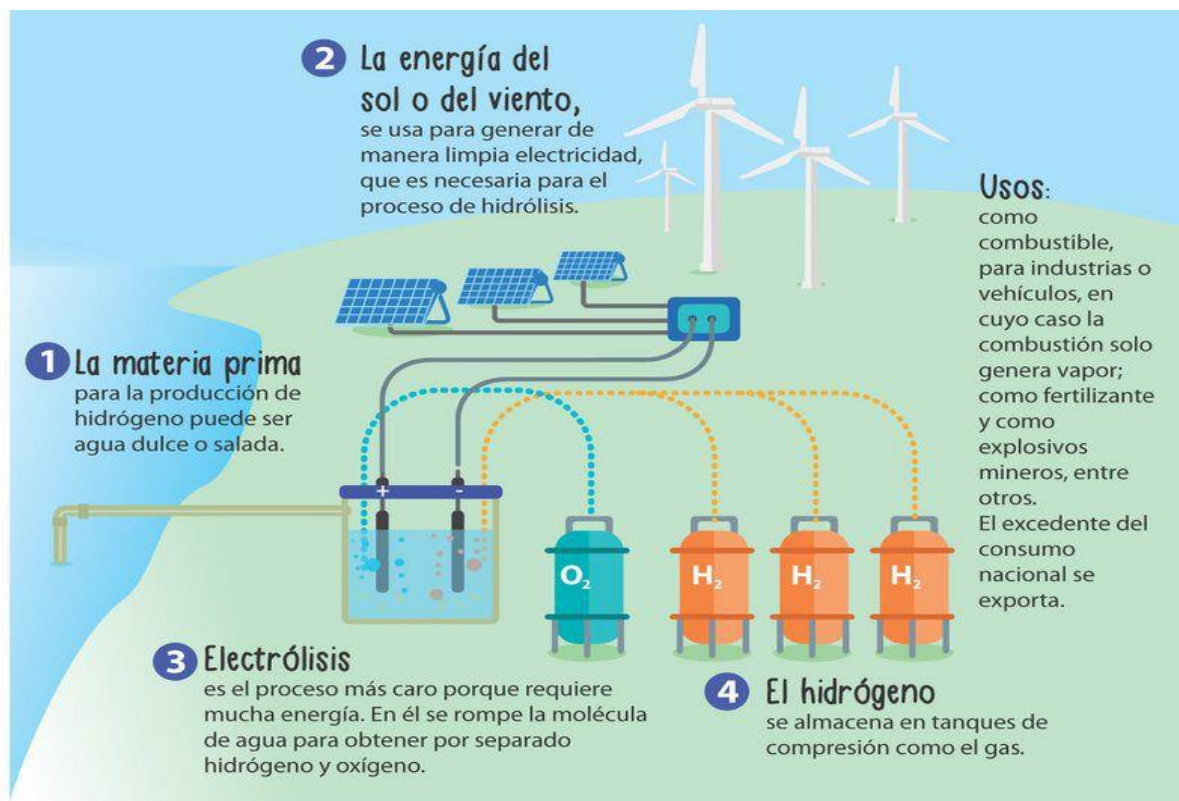


Figura 18 Ciclo de vida del hidrogeno verde

Fuente:



### 6.2.1. Criterios para la selección del método para la obtención de hidrógeno verde

Considerando el ciclo de vida del hidrógeno verde, se postulan los siguientes criterios:

*Tabla 4 Criterios fase1*

<b>Generación propia de Hidrógeno Verde para minería</b>	
1. Contar con los costos de inversión para un generador de hidrogeno	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fondos CORFO:</li><li>- Capital propio</li><li>- Alianza con otras empresas</li></ul>
2. Contar con la tecnología para la obtención de energía renovable	<ul style="list-style-type: none"><li>- Solar</li><li>- Eólica</li></ul>
3. Selección de Electrolizador para la producción propia de Hidrógeno verde,	<ul style="list-style-type: none"><li>- Electrolizador Alcalino</li><li>- Electrolizador PEM</li></ul>

En base a este criterio, se debe tener en consideración; que si la empresa no cuenta con el capital suficiente para llevar a cabo la implementación de hidrógeno, también puede crear alianzas o bien postular a un fondo CORFO (ayuda gubernamental), una vez obtenido el capital, se debe determinar cuáles serán las energías renovables a utilizar, ya sea solar, eólica o ambas, una vez decidido esto y por último, se definirá que electrolizador es el más conveniente para llevar a cabo el proceso de electrólisis, para así, obtener Hidrógeno Verde.

## 6.2.2. Criterios para la elección de compra del hidrógeno verde

*Tabla 5 Criterios para la compra de H2V*

<b>Compra de Hidrógeno Verde</b>	
1. Empresas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Convenios</li><li>- Red de distribuidores</li></ul>
2. Transporte del H2V	Se deberá tener en consideración: <ul style="list-style-type: none"><li>- Normativa Regulatoria</li><li>- Capacitación sobre el manejo de H2 verde como combustible</li></ul>
3. Almacenamiento	Para esto se deberá contar con: <ul style="list-style-type: none"><li>- Cilindros contenedores de gas de hidrógeno verde</li></ul>

Este criterio establece que; como etapa inicial para la obtención de Hidrógeno Verde y considerando que no es viable producirlo de forma propia, se debe encontrar una empresa que tenga convenio o bien sea distribuidora de H2V, para luego transportarlo, almacenarlo y poder hacer uso de este en la faena.

Tabla 6 Criterio para el consumo energetico de H2V

<b>Consumo en minería</b>	
Celdas de combustibles	<ul style="list-style-type: none"><li>- Para ser utilizado como combustible en vehículos eléctricos en minería</li></ul>
Motor dual H2V/DIESEL	<ul style="list-style-type: none"><li>- Para modificación de motores Diesel, en vehículos mineros</li></ul>
Combustión	<ul style="list-style-type: none"><li>- Generación eléctrica</li><li>- Generación de calor</li></ul>

Hasta ahora, las implementaciones de hidrógeno verde en minería se basan en el uso de H2V como combustible para el transporte y en la generación de electricidad. En la actualidad, aún no hay proyectos que abarquen otras formas de implementación en minería. por lo cual la implementación del H2V en el suministro eléctrico de las instalaciones mineras para casinos, centrales de telecomunicaciones sería un avance innovador y sumamente importante para en un futuro quizás convertir al hidrógeno verde como nuestra principal fuente de energía.

*Tabla 7 Criterios selección de seguridad y normativa interna*

<b>Seguridad y Normativa Aplicable</b>	
Medidas de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción</li> <li>- Manejo y uso seguro del hidrógeno</li> <li>- Procedimientos internos</li> <li>- Capacitaciones al personal</li> </ul>
Normativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estándares internacionales</li> <li>- Nueva normativa</li> <li>- Actualización de normativa existente</li> </ul>
Entidades Gubernamentales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ministerio de Energía</li> <li>- SERNAGEOMIN</li> </ul>

*Tabla 8 Criterios para la Operación de una planta minera con H2V*

<b>Operación</b>	
Tipo de planta minera	Mina subterránea, mina rajo abierto, pequeña minería, gran minería.
Selección de la tecnología	Celdas de combustibles instaladas Suministro estacionario de electricidad a H2V instalada en la mina
Ubicación geográfica de la planta minera	Identificación de comunidades aledañas, proveedores de H2V

### 6.3. Plan de acción

El plan de acción tiene por objetivo la orientación para pequeña minería y según las factibilidades también para la gran minería de Implementar H2V en los procesos de transporte y carguío de material/mineral en mina subterránea y/o de rajo abierto, esto por medio de proponer técnicas y tecnologías viables que permitan la transición a la utilización de energías derivadas del petróleo como lo es en el transporte el Diesel, gasolina y petróleo y optar por la electro movilidad impulsada por hidrógeno proveniente de fuentes de ERNC como lo son los parques fotovoltaicos, eólicos, biomasa u otro que el suministrador de este recurso estime conveniente. Se representarán las acciones a seguir por medio de diagramas que visualicen el estado actual de una mina diseñada para funcionar con energía eléctrica. esta estrategia ayudará a cumplir las metas de des carbonización propuestas para el 2050 ya que el carbón es una de las principales fuentes de generación de energía eléctrica en Chile teniendo un porcentaje de 40% de la capacidad suministrada provenía de instalaciones a base de carbón.

Principios del plan de acción:

- Sostenibilidad y Sustentabilidad
- Acción contra el cambio climático
- Vías de Desarrollo
- Visión

6.3.1. Objetivo del plan: El plan tiene como objetivo servir como guía para la implementación de H2V en minería. en procesos de transporte y carguío y la planeación de transición energética de una mina

6.3.2. Objetivo de implementación: Reducir las emisiones de gases contaminantes provenientes de la combustión de combustibles fósiles en el proceso de carguío y transporte de minerales para alcanzar las metas propuestas por el gobierno.

### 6.3.3. Ejes de Acción

A Continuación, se detallarán las etapas de la implementación del hidrogeno verde en minería y su lineamiento para accionar las actividades del presente plan de acción.

*Tabla 9 Alineamientos para el plan de acción*

Etapa	Objetivo específico	Línea de Acción
Viabilidad	Definir si las condiciones geográficas y económicas de la empresa minera son viables con la implementación del H2V.	Realizar estudio de condiciones económicas, geográficas y/o asesoramiento.
Diseño de implementación	En base a la mina diseñar en un esquema las instalaciones e identificar sitios para la incorporación de la tecnología seleccionada Identificación del proceso productivo a través de un diagrama y seleccionar los procesos de incorporación de H2V (procesos sugeridos transporte de mineral, auto movilización eléctrica, suministro eléctrico de instalaciones)	Recurso Humano Idóneo para el diseño de la implementación según mina

Almacenamiento	Se debe determinar un sector, bodega, dependencia, etc. Destinada para el almacenamiento del H2V. Idealmente, debe ubicarse en dependencias subterráneas, o bien, en contenedores presurizados, esto debido a que el hidrógeno al ser muy liviano tiende a escaparse cuando es almacenado en contenedores o recipientes poco adecuados.	Construcción de almacén o acondicionamiento de bodega:  * Si la faena no cuenta con un lugar acondicionado para este fin, se deberá construir una bodega de almacenamiento.
Seguridad y Aplicación de normativa actualizada (2021)	Capacitación al personal sobre la manipulación y funcionamiento del hidrógeno.  difusión de procedimientos relacionados con el hidrógeno verde  Mantenimiento Sistemas tecnológicos que estén en contacto con el gas H2V	Adquisición de recursos que permitan capacitar al personal

#### 6.3.4. Medidas de acción

Para cada línea de acción se deberá detallar gráficamente las medidas que se llevarán a cabo para realizar las acciones esto podrá ser a través de diagramas, esquemas, tablas. Dejando claro los responsables, metas, indicador de seguimiento descripción de la medida lo más detallada posible y definir periodo de aplicación esto puede ser a través de una planificación utilizando en lo posible herramientas de planificación como lo es una carta Gantt o un cronograma definiendo plazos, responsabilidades e indicadores de seguimiento que permitan medir el cumplimiento de las acciones. (Ministerio del medio ambiente, 2017)

## 7. CONCLUSIÓN

A modo de conclusión, se pueden abordar diferentes puntos, uno de ellos es; destacar que, el hidrógeno verde en la actualidad chilena aún es un recurso energético desconocido para muchas empresas y profesionales, por lo que, su tecnología y métodos efectivos de implementación son aún incipientes. Por otro lado, en la minería chilena es un tema que se encuentra en la palestra, puesto que, este recurso energético es altamente viable para alcanzar la descarbonización basándose en las metas medio ambientales propuestas por el gobierno y en las ventajosas condiciones geográficas que benefician a la economía de escala del hidrógeno verde.

En base al estudio realizado, se postula que; la implementación de hidrogeno verde es altamente viable en la faena de Carguío y Transporte, es en esa área donde se está enfocando la totalidad de proyectos que se están llevando a cabo en el territorio nacional, se espera que en el futuro, la cantidad de usos para esta ERNC se logre extender a los demás procesos mineros. Las alternativas actuales para la implementación de hidrogeno verde para el transporte en minería se basan en dos opciones, la primera; la adaptación de un motor convencional a motor hibrido, o bien, la utilización de celdas de hidrogeno en camiones eléctricos. Los criterios utilizados para elección de la tecnología a utilizar en conjunto con los procesos mineros con los que sería viable la implementación de Hidrogeno Verde, se ven reflejados en el planteamiento del análisis de resultados expuesto.

Con respecto a los costos de inversión para los métodos de implementación mencionados anteriormente se estableció que; aun no existen costos fijos para la utilización de hidrogeno verde, puesto que, hasta ahora solo es posible basarse en proyectos piloto o proyectos en desarrollo, entendiendo que son



nuevas tecnología a las cuales aún se está adaptando la industria. Lo que es posible establecer ad-portas, es que, el costo de producción del Hidrogeno Verde es de unos 8 dólares por kilo, por lo que, la variación del costo dependerá de la tecnología que decida usar la empresa para su implementación.

Con respecto al uso de energía convencional en la minería (derivados del petróleo, como, por ejemplo; Diesel), si se implementase el Hidrogeno Verde en la totalidad del proceso de Carguío y transporte; el consumo energético que se podría reemplazar por esta ERNC seria; en minería a rajo abierto se acerca al 75%, en minería subterránea se aproxima al 43%.

Los criterios planteados en el presente trabajo de título permiten facilitar la toma de decisiones respecto a la implementación del hidrógeno verde en minería para empresas mineras que desean bajar sus emisiones de gases de efecto invernadero en su proceso de transporte de material minero y/o en movilizaciones en generales ya sea para inspecciones, rondas, ingreso a la mina y/o salida de esta.

La creación de un plan de acción para la implementación el hidrógeno verde, permitirá a las empresas comprender mejor el proceso de: generación, utilización y ventajas del uso del Hidrógeno Verde, puesto que, este ítem da a conocer los diferentes criterios que se deben abordar para poder llevar a cabo un proceso productivo sustentable como los vistos anteriormente.

Con respecto a los beneficios del hidrógeno verde, está científicamente probado que las reducciones de GEI disminuirán considerablemente una vez que se lleve a cabo de forma total la implementación del hidrógeno verde, puesto que, como se mencionó anteriormente, este no produce emisiones, es por esto, que el uso de esta nueva iniciativa toma protagonismo en los procesos productivos presentes en la minería, permitiendo que las empresas que forman parte de esta industria se vuelvan más competentes, al llevar a cabo un

proceso de producción eficiente y amigable con el medio ambiente. Es por esta y muchas otras razones, que se debe incentivar a las empresas mineras a atreverse a conocer e implementar nuevas tecnologías, y de una vez por todas dejar atrás los combustibles fósiles que han sido utilizados y explotados durante tantos años dañando al planeta y trayendo consigo graves consecuencias medioambientales.

Es de suma importancia, que las empresas mineras presentes en el país avancen con sus estudios y proyectos piloto, puesto que, hasta el momento no existen muchas formas de implementar el hidrógeno verde en minería, si no que, actualmente solo destacan, utilizarlo como combustible, como almacenador energético, como sustituto del gas natural, etc. Más estudios e investigaciones permitirían encontrar más formas de implementación viables con el rubro minero.

Otro punto importante, es poder destacar que Chile es uno de los principales países con gran capacidad de generar en energías renovables, es por esto, que debe sacar provecho de sus ventajas e idear un método idóneo de uso. que permita adelantarnos al futuro de la revolución de la energía verde. Se espera que, en un futuro no muy lejano, además de hacer uso del hidrógeno verde en las diferentes industrias chilenas, este también se pueda exportar, es decir, no solo podría ser beneficioso para el medio ambiente, sino que, además, podría ser provechoso para la economía. Está más que claro que la implementación del hidrógeno verde, considerando las etapas de obtención, producción y todo lo que conlleva, requiere una inversión bastante alta, ya que al ser una tecnología relativamente nueva, los costos que involucra siguen siendo bastante altos y esto no se puede dejar pasar por alto, es por ello que es de suma importancia concientizar a la industria minera de los reales beneficios medio ambientales que trae consigo la implementación del hidrógeno verde, y más importante aún, informarlos de las consecuencias que podría traer consigo

el excesivo uso de combustibles fósiles derivados del petróleo, los cuales producen gases de efecto invernadero que provocan que el cambio climático se ponga en manifiesto, de esto, hay muchas evidencias y observaciones, como lo son; el aumento de las temperaturas medias del aire y el océano, el aumento del nivel del mar, la ausencia de las precipitaciones y la aparición de sequías, entre muchas otras consecuencias. Dicho esto, se pretende que, a través de la concientización, se logre persuadir e incentivar a las empresas a formar parte de este nuevo gran proyecto que es el Hidrógeno Verde, es importante considerar, que se pretende reducir los costos actuales de implementación en los próximos años.

En un análisis profundo en este trabajo de tesis y la recopilación de información disponible en la web cabe mencionar que; al ser un recurso energético nuevo no existe marco regulatorio ni antecedentes en nuestro país sobre el uso de esta tecnología, por lo que, una buena guía sería la adaptación de normas internacionales sobre el uso, almacenamiento, medidas de seguridad sobre hidrógeno verde. las normas expuestas en el trabajo de título sirven de guía para la efectiva implementación del hidrógeno verde como lo es la ISO 19880-8.

Como punto final, es importante mencionar, que se requiere una mayor participación gubernamental en cuanto a las sanciones que podrían ser aplicadas a las industrias contaminadoras que año tras año han emitido grandes cantidades de gases de efecto invernadero, priorizando la producción y dejando de lado sus compromisos de reducción, es por esto, que debieran proponerse proyectos de ley más estrictos en materia medio ambiental.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- bbc. (31 de marzo de 2021). *www.bbc.com*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777>
- BCN. (2008). *Biblioteca del congreso nacional de chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=270212>
- beauchef minería. (2021). *Minería y cambio climático*. Santiago: Patricio Meller, Javier Ruiz del Solar, Gabierla Novoa. Obtenido de <http://www.beauchefminería.cl/wp-content/uploads/2021/05/Miner%C3%81a-y-Cambio-Clima%C3%81tico-Si%C3%81ntesis-Ejecutiva.pdf>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (Septiembre de 2021). *www.bcn.cl*. Obtenido de [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN\\_Matriz\\_energetica\\_electrica\\_en\\_Chile.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32492/1/BCN_Matriz_energetica_electrica_en_Chile.pdf)
- bamericas. (Marzo de 2021). *www.bamericas.com*. Obtenido de <https://www.bamericas.com/es/analisis/hidrogeno-verde-que-esta-haciendo-la-mineria-de-chile-para-adoptarlo>
- Centro de energía UC. (2020). *Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile*. Santiago, Chile: Deutsche Gesellschaft für.
- Chile, F. d. (2020). *www.fch.cl*. Obtenido de <https://fch.cl/iniciativa/hidrogeno-verde/>

- cnn chile. (2020). <https://www.cnnchile.com/>. Obtenido de [https://www.cnnchile.com/futuro360/urge-ley-glaciares-chile-7-mil-de-ellos-estan-en-grave-riesgo\\_20201016/](https://www.cnnchile.com/futuro360/urge-ley-glaciares-chile-7-mil-de-ellos-estan-en-grave-riesgo_20201016/)
- Conicet. (2020). [www.mendoza.conicet.gov.ar](http://www.mendoza.conicet.gov.ar). Obtenido de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Energ.htm>
- Coniset. (s.f.).
- Consejo Minero. (2013). *Consejo minero*. Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/Miner%C3%ADa-2020-Consejo-Minero.pdf>
- Consejo Minero. (31 de diciembre de 2020). [www.consejominero.cl](http://www.consejominero.cl). Obtenido de <https://consejominero.cl/prensa/grandes-mineras-cierran-inedito-acuerdo-para-reducir-sus-emisiones/>
- Deloitte. (Junio de 2016). [www2.deloitte.com](http://www2.deloitte.com). Obtenido de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cl/Documents/energy-resources/cl-er-estudio-energ%C3%ADa-chile-parte1.pdf>
- Fundación de Chile. (s.f.). [www.educacionprofesional.ing.uc.cl](http://www.educacionprofesional.ing.uc.cl). Obtenido de <https://educacionprofesional.ing.uc.cl/una-oportunidad-estrategica-para-chile-hidrogeno-verde/#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20verde%20se%20produce%20a%20partir%20de%20agua%20y%20energ%C3%ADas%20renovables.&text=La%20mol%C3%A9cula%20de%20H2%20tiene,que%20la>
- GIZ. (marzo de 2018). *Tecnologías del HIDROGENO y perspectivas para Chile*. (Deutsche Gesellschaft Für). Santiago, Providencia, Chile. Obtenido de [93](https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

content/uploads/2020/07/23185348/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf

Guerra, C. F., & Reyes-Bozo, L. (septiembre de 2019). *www.repositorio.uautonoma.c*. Obtenido de <https://repositorio.uautonoma.cl/bitstream/handle/20.500.12728/3191/Hidrogeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Guerra, J. (18 de mayo de 2021). *www.cipyics.cl*. Obtenido de <https://www.cipyics.cl/blog/energias-renovables-y-el-impacto-del-hidrogeno-verde-la-futura-nueva>

Minería chilena. (5 de enero de 2021). *www.mch.cl*. Obtenido de <https://www.mch.cl/2021/01/05/reduccion-de-emisiones-en-mineria-la-oportunidad-de-una-alianza-historica-publico-privada-para-la-innovacion-en-sostenibilidad/#>

Ministerio del medio ambiente. (2017). *Plan de acción nacional de cambio climático 2017-2020*. Santiago.

Reporte Minero. (28 de marzo de 2021). Conoce los proyectos de hidrógeno verde en minería. TVN.

Revista ei. (2020). Minería: Consumo eléctrico representa el 53% en los procesos productivos de concentración. *Electricidad*, 1. Obtenido de <https://www.revistaei.cl/2020/11/30/mineria-consumo-electrico-representa-el-53-en-los-proceso-productivo-de-concentracion/#>

sgk planet. (2020). *sgkplanet.com*. Obtenido de <https://sgkplanet.com/por-que-es-costoso-producir-hidrogeno-verde/>

sonami. (2012). <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/04/01.-Etapas-del-Proceso-Productivo-de-una-Mina.pdf>.

*www.educacionprofesional.ing.uc.cl.* (Agosto de 2021). Obtenido de <https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2021/08/25/hidrogeno-verde-como-es-el-millonario-combustible-ecologico-del-futuro-que-comenzo-a-producir-chile/>