



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

ESTUDIO DEL USO DEL HIDRÓGENO VERDE PARA
DISMINUIR EL IMPACTO DE CONTAMINACIÓN
AMBIENTAL EN LA FABRICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS
ANFOS

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERA CIVIL DE MINAS**

JOCELYN PATRICIA ROJAS CAAMAÑO

PROFESOR GUÍA

Mg. Carlos Moraga Cruz

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Dr. Fernando Cataldo Droguett

Mg. Francisco Rivas Saldaña

CURICÓ - CHILE

2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

RESUMEN

La fabricación del explosivo ANFO a partir de recursos renovables ha sido una preocupación importante para las grandes industrias de explosivos en el presente año, que tienen como objetivo entregar a las empresas mineras un producto sustentable y amigable con el medio ambiente. Dado a la situación y el interés por verificar la factibilidad del hidrógeno verde en la fabricación de explosivos, específicamente el ANFO, se realizó un estudio bibliográfico con el fin de conocer cada una de las etapas claves que se lleva a cabo para producir hidrógeno gris mediante el reformado de hidrocarburos e hidrógeno verde por medio de la electrolisis del agua y utilizando energía renovable. Esto, para producir amoniaco en un proceso llamado Haber-Bosch en base a hidrógeno y nitrógeno del aire. Para luego, mezclar amoniaco y ácido nítrico y obtener nitrato de amonio, la materia prima en un 94% del ANFO.

Además, se realizó un estudio basado en la cantidad de hidrógeno necesario para cubrir las necesidades de nitrato de amonio en los próximos 10 años, por lo que fue necesario realizar estimaciones utilizando proyecciones hacia el futuro, de la cantidad de nitrato de amonio que se fabricó en Chile durante los años 2013 y 2020. De esta forma, se obtuvo la cantidad de hidrógeno necesario, la cantidad de emisiones liberadas en caso de producir el hidrógeno gris o verde, y los costos totales por año.

Finalmente, utilizando los resultados del caso de estudio, se realizó una evaluación económica de una planta generadora de hidrógeno capaz de producir el total de hidrógeno anual necesario para producir nitrato de amonio durante los próximos 10 años. Considerando el precio de venta estimado que tendrá el hidrógeno, el costo total de inversiones, costo de producción, capital de trabajo, depreciación, valor de desecho, entre otros. Resultando un proyecto con una rentabilidad del 31% con ganancias por sobre los 45 millones de dólares y un periodo de recuperación de 4,8 años.

Palabras Claves: Hidrógeno verde, explosivos, ANFO, electrolisis del agua, reformado de hidrocarburos, emisiones, costos de producción, evaluación económica.

ABSTRACT

The manufacture of the ANFO explosive from renewable resources has been a major concern for the explosives industries this year, whose objective is to deliver a sustainable and environmentally friendly product to mining companies. For this, a bibliographic study was done in order to know each of the key's stages that are carried out to produce gray hydrogen by the reforming of hydrocarbons and green hydrogen through the electrolysis of water using renewable energy. This, to produce ammonia in a process called Haber-Bosch based on hydrogen and nitrogen from the air. To later, mix ammonia with nitric acid and obtain ammonium nitrate, the raw material of ANFO with a 94%.

In addition, a case study was carried out based on the amount of hydrogen needed to cover the needs of ammonium nitrate in the next 10 years. Therefore, it is necessary to make estimates, using projections towards the future of the amount of ammonium nitrate that was manufactured in Chile during the years 2013 and 2020. In this way, the amount of hydrogen needed will be obtained, the number of emissions released in case of producing gray or green hydrogen, and the total costs per year.

Finally, using the results from the case of study, and economic evaluation was made of a hydrogen generating plant capable of producing the total annual hydrogen needed to produce ammonium nitrate for the next 10 years. Considering the estimated sale price that hydrogen will have, the total investment cost, production cost, working capital, depreciation, scrap value, etc. Resulting in a project with a profitability of 31% with profits of over 45 million dollars.

Keywords: Green hydrogen, explosives, ANFO, water electrolysis, hydrocarbon reform, emissions, production costs, economic assessment.

AGRADECIMIENTOS

Han sido 6 años de mi vida con buenos y malos momentos, en donde no solo me dediqué a estudiar, si no a crear amistades, amores, crecer como persona y profesionalmente, trabajar, y lo más importante ser madre. Aprendí que las cosas difíciles por las que me tocó pasar fueron razones para seguir adelante, crecer y valorar a las personas que están siempre conmigo.

Fui madre a los 15 años, pocos creyeron en mis capacidades, pero acá estoy, cerrando una etapa más de mi vida, de la mejor manera. Llevando conmigo el amor y orgullo de mi hija Helen Rojas, que gracias a ella logré estar siempre de pie firme en mis peores momentos, sabiendo que ella era la razón para seguir luchando; el amor y una mejor relación con mis padres Jeannette Caamaño y Rodrigo Rojas, que a pesar de todos los malos momentos que pasamos, siempre estuvieron conmigo para ser alguien en la vida, gracias a ellos y su amor puedo hoy ser profesional; el amor, apoyo incondicional en los momentos más tristes de mi vida, sacándome siempre risas y entregándome bellos momentos, aguantándome todo, mi pareja Eric Campos, jamás olvidare todo lo que has estado para mí y mi hija; una gran amistad que sin duda es la mejor, Carla Valenzuela, espero siempre tenerte presente en mi vida; y el apoyo de profesores que me guiaron a llevar a cabo este trabajo, Fernando Cataldo, Carlos Moraga y Francisco Rivas, gracias por los conocimientos brindados en cada una de sus áreas, y a todos por los cuales logré ser su alumna.

Gracias a todos por ser parte de mi vida y aportar de distintas formas para ser mejor persona y profesional.

Helen Rojas, your mom loves you with all her heart.

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes y motivación.....	1
1.2	Descripción del problema.....	2
1.3	Solución propuesta.....	3
1.4	Objetivos.....	3
1.4.1	Objetivo general.....	3
1.4.2	Objetivos específicos.....	3
1.5	Alcances.....	4
1.6	Metodologías y herramientas utilizadas.....	5
1.7	Resultados esperados.....	6
1.8	Organización del documento.....	6
2	Marco Teórico.....	8
2.1	Tronadura.....	8
2.1.1	Explosivos.....	8
2.2	Fuentes de energía renovable.....	9
2.2.1	Energía Solar.....	9
2.2.1.1	Energía solar térmica.....	9
2.2.1.2	Energía solar fotovoltaica.....	11
2.2.2	Energía Eólica.....	13
2.3	Hidrógeno.....	14
2.4	Nitrógeno.....	16
2.5	Amoniaco.....	17
2.6	Ácido Nítrico.....	17
2.7	Combustible.....	18
2.8	Óxidos de nitrógeno.....	18
2.9	Dióxido de carbono.....	19
2.10	Planta generadora de hidrógeno verde.....	19
2.11	Proyecciones.....	20
2.11.1	Proyección Absoluta.....	20

2.11.2 Proyección Porcentual.....	21
2.11.3 Proyección Logarítmica y Lineal.....	21
2.12 Evaluación de proyectos	22
2.12.1 Etapas de un proyecto.....	22
2.12.2 Ingresos y egresos	24
2.12.3 Inversiones	25
2.12.4 Depreciación.....	25
2.12.5 Valor libro	25
2.12.6 Valor de desecho económico	26
2.12.7 Capital de trabajo	26
2.12.8 Tasa de rendimiento mínimo aceptable	26
2.12.9 Valor Actual Neto.....	26
2.12.10 Tasa Interna de Retorno	27
2.12.11 Periodo de recuperación	27
2.12.12 Relación beneficio-costos.....	27
3 Ammonium nitrate fuel oil.....	28
3.1 Descripción	28
3.2 Clasificación	29
3.2.1 ANFO Aluminizado	29
3.2.2 ANFO Pesado	30
3.2.3 ANFO Liviano	30
3.3 Aplicaciones en minería.....	31
3.4 Procesos de fabricación – Obtención del hidrógeno.....	31
3.4.1 Obtención del hidrógeno a partir de del reformado de hidrocarburos.....	31
3.4.1.1 Emisiones liberadas.....	33
3.4.1.2 Costos	34
3.4.2 Obtención del hidrógeno a partir de recursos renovables	34
3.4.2.1 Energías renovables disponibles en Chile	34
3.4.2.2 Hidrógeno a partir de la electrolisis.....	37
3.5 Procesos de Fabricación - Obtención del amoníaco.....	39
3.5.1 Emisiones liberadas en la obtención de amoníaco gris	39
3.5.2 Emisiones liberadas en la obtención de amoníaco verde.....	41

3.6	Procesos de Fabricación - Obtención del nitrato de amonio	41
3.6.1	Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno gris.....	43
3.6.2	Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno verde	45
3.7	Procesos de Fabricación - Obtención del ANFO	46
4	Caso de estudio	47
4.1	Producción de nitrato de amonio	47
4.1.1	Emisiones liberadas al utilizar amoniaco gris.....	51
4.1.2	Emisiones liberadas al utilizar amoniaco verde	52
4.1.3	Emisiones liberadas al producir ácido nítrico	54
4.2	Producción de Amoniaco.....	54
4.2.1	Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno gris.....	56
4.2.2	Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno verde	57
4.2.3	Emisiones liberadas al producir nitrógeno	59
4.3	Evaluación económica planta generadora de hidrógeno verde	60
4.3.1	Costo producción de hidrógeno	61
4.3.2	Ingresos	63
4.3.3	Equipos.....	64
4.3.4	Flujo de caja	65
5	Análisis de Resultados.....	67
5.1	Emisiones liberadas.....	67
5.2	Costos.....	68
5.3	Evaluación económica.....	69
6	Conclusión.....	71
7	Referencias.....	73
	ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación de los explosivos industriales.	9
Figura 2.2: Esquema de la energía solar térmica.....	10
Figura 2.3: Esquema representativo de la energía solar fotovoltaica.....	12
Figura 2.4: Fuerzas de sustentación y de arrastre.	13
Figura 2.5: Esquema de los distintos procesos de producción del hidrogeno en base a una variedad de fuentes de energía utilizadas.	16
Figura 2.6: Esquema proceso de producción con un electrolizador alcalino.....	20
Figura 2.7: Etapas de un proyecto.	22
Figura 2.8: Beneficios de un proyecto.....	24
Figura 3.1: Perlas de ANFO (Mezcla de Nitrato de Amonio y petróleo).....	28
Figura 3.2: Reacciones en el proceso de reformado de hidrocarburos con vapor de agua.	32
Figura 3.3: Clasificación del hidrógeno en hidrógeno limpio y sucio.....	33
Figura 3.4: Costo de producción del hidrógeno gris y verde (USD/kg H ₂).....	34
Figura 3.5: Cartografía de radiación solar.....	35
Figura 3.6: Cartografía mundial de la velocidad del viento.....	35
Figura 3.7: Cartografía de la velocidad del viento en Chile.....	36
Figura 3.8: Costo nivelado de electricidad renovable (USD/MWh).	36
Figura 3.9: Principio de funcionamiento de la electrólisis.	37
Figura 3.10: Costo nivelado de hidrógeno verde (USD/kg H ₂).....	38
Figura 3.11: Proceso de Haber – Bosch para la fabricación de amoníaco.	39
Figura 3.12: Emisiones liberadas en la producción de Amoniacó Gris.	40
Figura 3.13: Emisiones liberadas en la producción de Amoniacó Verde.	41
Figura 3.14: Diagrama de flujo del proceso de producción del nitrato de amonio.	42
Figura 3.15: Emisiones liberadas en la producción de nitrato de amonio utilizando hidrógeno gris.	45
Figura 3.16: Emisiones liberadas en la producción de nitrato de amonio utilizando hidrógeno verde.....	45
Figura 3.17: Esquema de fabricación de ANFO.	46
Figura 5.1: Producción de ANFO entre 2021 y 2030.....	67

Figura 5.2: Total de emisiones de CO ₂ liberadas al producir ANFO en base al hidrógeno gris y verde durante el 2021 y 2030.....	68
Figura 5.3: Costos de producción del hidrógeno gris y verde en base a la producción anual necesaria para producir amoniaco.	69
Figura A.1: Tabla Periódica.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de la energía solar térmica.	11
Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica.	12
Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de la energía eólica.....	14
Tabla 2.4: Comparación del contenido de energía en distintos tipos de combustibles.	15
Tabla 2.5: Propiedades físicas y químicas del diésel.....	18
Tabla 3.1: Principales características del ANFO.	29
Tabla 3.2: Propiedades del ANFO aluminizado en función del aluminio adicionado.	30
Tabla 3.3: Propiedades del ANFO pesado en función de las emulsiones adicionadas.	30
Tabla 3.4: Ventajas y desventajas del reformado de hidrocarburos.....	33
Tabla 3.5: Emisiones de CO ₂ en la producción de amoniaco para distintos tipos de combustibles y tecnologías utilizadas.....	40
Tabla 3.6: Emisiones producidas en la producción de nitrato de amonio y sus intermedios: amoniaco y ácido nítrico.	44
Tabla 4.1: Producción anual de Enaex entre los años 2013 – 2020.	47
Tabla 4.2: Proyecciones de la producción de nitrato de amonio en Chile durante 2021-2030. .	48
Tabla 4.3: Cantidad de ANFO producido en Chile durante el 2021 y 2030.	48
Tabla 4.4: Gramaje total del amoniaco, oxígeno, ácido nítrico y agua.....	49
Tabla 4.5: Gramaje total del amoniaco, ácido nítrico, y nitrato de amonio.	50
Tabla 4.6: Tonelaje total de amoniaco y ácido nítrico necesarios para producir nitrato de amonio.	51
Tabla 4.7: Emisiones liberadas en el proceso de producción del nitrato de amonio tras utilizar amoniaco gris, entre 2021 y 2030.	53
Tabla 4.8: Emisiones liberadas en el proceso de producción del nitrato de amonio tras utilizar amoniaco verde, entre 2021 y 2030.....	53
Tabla 4.9: Emisiones liberadas de CO ₂ en la producción de ácido nítrico.....	54
Tabla 4.10: Gramaje total del nitrógeno, hidrógeno, y amoniaco.....	55
Tabla 4.11: Cantidades de hidrógeno y nitrógeno necesarios para producir amoniaco entre el 2021 y 2030.....	56

Tabla 4.12: Emisiones de CO ₂ liberadas hacia la atmosfera tras producir amoniaco a partir del hidrógeno gris.....	57
Tabla 4.13: Emisiones de CO ₂ liberadas hacia la atmósfera a tras producir amoniaco a partir del hidrógeno verde.	58
Tabla 4.14: Emisiones liberadas de CO ₂ en la producción de hidrógeno gris y verde.	59
Tabla 4.15: Emisiones liberadas de CO ₂ en la producción nitrógeno.....	60
Tabla 4.16: Costos de producción del hidrogeno gris y verde entre el 2020 y 2030.....	62
Tabla 4.17: Costos de producción del hidrógeno gris y verde (USD/Ton).....	63
Tabla 4.18: Precio de venta del hidrógeno verde, producido a partir de la electrolisis del agua utilizando energía eólica proveniente del sur.	64
Tabla 4.19: Balance de equipos necesarios para la planta de hidrógeno verde.	65
Tabla 4.20: Flujo de caja en USA dólar.	66
Tabla 4.21: VAN, TIR, Periodo de recuperación y razón beneficio-costos.	66
Tabla A.1: Calendario de inversiones.....	82
Tabla A.2: Calendario de depreciación.	83

1 Introducción

1.1 Antecedentes y motivación

Dentro de la cadena productiva de la minería existen distintas operaciones que permiten transformar los insumos en bienes. Una de las principales operaciones es la tronadura, que tiene como objetivo la extracción del mineral por medio de la fragmentación del macizo rocoso, que se realiza gracias a la liberación de energía de explosivos, generando una distribución de tamaños de roca adecuados para ser cargados, transportados y chancados. Dentro de los explosivos más utilizados en las operaciones de tronadura, se encuentran la dinamita, los hidrogeles, las emulsiones y el ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*).

Este último es considerado como un explosivo de tipo B-b, el cual está constituido por nitrato de amonio, gasóleo y en algunos tipos de ANFO con aluminio grado pintura. Se caracteriza por tener un bajo costo y alta potencia debido al gran volumen de gases que se desprenden en su detonación, lo que genera un poder rompedor impresionante. Lo cual lo ha llevado a ser uno de los explosivos más comprados y utilizados en la industria minera chilena e internacional. Sin embargo, tiene aspectos negativos hacia el medio ambiente, puesto que su fabricación produce una alta contaminación ambiental.

Actualmente, se está buscando constantemente dentro de la minería, que todos sus procesos estén dedicados a cumplir cada una de sus funciones sin la necesidad de causar daños en nuestro entorno, por lo que la etapa de tronadura no es una excepción, y se propone la incorporación del hidrógeno verde para la fabricación de explosivos ANFO, a partir de energías renovables, como una forma distinta y sustentable, que se quiere incorporar en los próximos años para disminuir la alta contaminación que genera la fabricación y el uso de este explosivo.

Empresas como Engie y Enaex en el 2019 firmaron para dar inicio al proyecto HyEx a partir del 2024 en la Planta Prillex ubicada en Mejillones, el cual está enfocado a la producción de amoniaco verde a través del hidrógeno verde, con el objetivo de obtener nitrato de amonio para la fabricación de explosivos que serán utilizados dentro del proceso de tronadura en minería. Dicho proyecto pretende operar en base a 2.000 MW de energía renovable que energizaría una planta de producción de hidrógeno verde de 1.600 MW, mediante la electrólisis del agua, la que alimentará una planta que transformará este hidrógeno junto al nitrógeno del aire, en amoniaco. El objetivo es ofrecer a la industria minera productos de tronadura fabricados con recursos renovables, de

baja emisión de carbono y que permitirían reducir aproximadamente 30.000 ton de CO₂ (Dióxido de carbono) (Diario Financiero , 2020).

Hoy en día, el hidrógeno verde, está en constante estudio y en desarrollo de nuevos proyectos para que, en un futuro no muy lejano, este elemento pueda tomar un papel fundamental en la industria minera, disminuyendo la gran contaminación del medio ambiente, que se están generando actualmente en los procesos de tronadura y en particular durante la fabricación de estos explosivos.

1.2 Descripción del problema

La tronadura es uno de los procesos más importantes al momento de poner en marcha la extracción de un mineral o en algunos procesos de desarrollo minero, tanto en minas de rajo abierto como en subterráneas. Para ambos casos, esta tiene el objetivo de fragmentar la roca de manera instantánea para ser transportada a su posterior procesamiento, por lo que, para poder hacerla efectiva, es necesario el uso de explosivos, los cuales son depositados al interior de la roca para su futura detonación.

El ANFO es uno de los explosivos de alta potencia y más utilizados por las empresas mineras en Chile y en el mundo, para el proceso de la tronadura. Este explosivo está compuesto por la combinación de nitrato de amonio y combustibles derivados del petróleo. Por lo que su detonación libera gases tóxicos a la atmósfera afectando la calidad del aire, como lo son los gases de combustión de los hidrocarburos que acompañan al ANFO: el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), y óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, estos últimos generados por una mala combustión. Además, de producir material particulado, impactando a la vegetación, materiales y al hombre. También, es un compuesto que prima por tener mayormente nitrato de amonio, que es muy soluble en agua, por lo que se debe tener un gran cuidado de que no entre en contacto con el agua, ya que puede fácil y rápidamente contaminarla.

Pero el gran problema de contaminación de este explosivo se centra en el proceso de fabricación del nitrato de amonio, el cual es obtenido por la reacción de amoníaco y ácido trioxonítrico V, y el amoníaco por reacción de nitrógeno e hidrógeno, siendo este último gas, obtenido a partir de hidrocarburos derivados del petróleo, lo cual genera una ingente cantidad de monóxido de carbono.

1.3 Solución propuesta

Debido a la gran contaminación que provoca la fabricación de este explosivo para el medio ambiente, mediante la obtención del hidrógeno a partir del proceso de reformado de hidrocarburos, es que surge la idea de la utilización del hidrógeno Verde para la fabricación de este explosivo.

El hidrógeno Verde es un gas capaz de ser utilizado también como combustible. Cuando se habla de hidrógeno verde, este se refiere a que su producción fue a través de energías renovables, como son la solar, hidroeléctrica, mareomotriz, o eólica. Este, se produce por un proceso conocido como electrólisis del agua, en el cual se separa las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno, usando la electricidad. Sus múltiples beneficios significarían reducir al menos en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero del país, entre estos, los que genera la minería.

Es por esto, que se plantea la idea de mejorar la fabricación del explosivo ANFO, a través del hidrógeno verde. Ya que este es el reactivo fundamental para la obtención del amoníaco verde. ¿Cómo?, obteniendo tras la electrólisis del agua el hidrógeno verde, el cual será combinado con el nitrógeno del aire para obtener amoníaco verde.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Estudiar la factibilidad técnica y económica de aplicar el hidrógeno a partir de la electrolisis del agua y fuentes de energía renovables para la producción del amoníaco en el proceso de fabricación del ANFO, con el fin de disminuir las emisiones de dióxido de carbono producida en tal fabricación y sus costos de producción, mediante el análisis de estudios bibliográficos y la evaluación económica para definir costos de producción y de una planta generadora de hidrógeno verde.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir las características de los ANFOs y su uso para conocer el rol que cumple dentro del área minera.
- Describir las etapas claves dentro del proceso de fabricación del ANFO para posteriormente conocer la cantidad de emisiones de dióxido de carbono que se producen en estos.

- Identificar la cantidad de emisiones liberadas en cada una de las etapas claves y los costos de producción del hidrógeno verde, para un caso de estudio específico.
- Realizar un análisis comparativo de las emisiones liberadas y los costos de producción, entre el uso del hidrógeno gris y verde para la fabricación del ANFO, con el fin de determinar cuál es el hidrógeno que menos contamina.
- Realizar una evaluación económica de una planta generadora de hidrógeno verde para identificar el tiempo de retorno de la inversión inicial y si efectivamente es rentable o no a largo plazo.

1.5 Alcances

La presente memoria se aborda de la siguiente forma:

- Se analiza un caso de estudio enfocado en conocer la cantidad de emisiones liberadas en cada una de las etapas claves del proceso de fabricación del ANFO, y los costos de producción del hidrógeno gris y verde, en los próximos 10 años. Además, los costos asociados a la instalación de una planta generadora de hidrógeno verde.
- Para el caso de estudio solo se considerará la producción de nitrato de amonio en Chile por parte de Enaex, asumiendo que toda la producción será para la fabricación del ANFO.
- Se estudia específicamente el proceso de generación del hidrógeno verde por medio de la electrólisis, ya que este produce este elemento con el mayor grado de pureza y con el menor grado de contaminación, pues es posible realizarlo a partir de energías renovables y de agua proveniente de acuíferos, ríos, aguas de desechos e incluso de agua de mar.
- Las fuentes de energía renovables a considerar en este estudio solo son la energía solar y eólica, al tener un mayor potencial en Chile.
- Se estudia como única solución el Hidrógeno Verde para entregar mejoras respecto a la contaminación generada en los procesos de tronadura proveniente de la fabricación del explosivo ANFO.
- Se estudia como único método de obtención del hidrógeno gris al reformado de hidrocarburos.
- La evaluación económica se realizará para una planta de hidrógeno verde, asumiendo la compra de energía eléctrica y no su producción en el proceso.

1.6 Metodologías y herramientas utilizadas

El estudio se enfoca en lograr estudiar la fabricación del explosivo tipo ANFO a partir del hidrógeno verde mediante los recursos renovables que existen. Por lo que, para llevar a cabo el estudio de la factibilidad del hidrógeno verde en los explosivos ANFO, se utilizarán en un principio metodologías y herramientas basadas en el:

- Estudio bibliográfico, que tendrá la finalidad de recaudar información para comprender los elementos o compuestos requeridos y los distintos procesos por el cual deben pasar para la obtención final del ANFO, fabricado a partir del hidrógeno gris y verde. Es por esto, que también se incluye una serie de estudios de los distintos métodos existentes para la obtención de energía por medio de recursos renovables y los costos que conlleva la producción de esta en las distintas formas. Además, de contemplar las emisiones liberadas y costos de producción en cada una de las etapas claves para la fabricación de ANFO.
- Estudio de costos, para conocer sobre los costos de producción que conlleva producir cada uno de los elementos y componentes para fabricar el explosivo.
- Análisis comparativo, entre los costos de producción de energía mediante los distintos recursos renovables con alto potencial en Chile, que se utilizará para la fabricación de hidrógeno verde, seguido por el amoníaco verde y el ANFO. Con el fin de establecer un único proceso factible, tanto de manera eficiente y económica, para la obtención del ANFO fabricado 100% con recursos renovables en Chile. De tal modo de generar una comparación entre los costos que conlleva la fabricación del ANFO en base a hidrógeno gris y verde, y sus respectivas ventajas y desventajas.
- Se utiliza Excel para desarrollar el análisis comparativo mediante cálculos y gráficos, de la información numérica obtenida sobre las emisiones liberadas y costos de producción del ANFO, en base al hidrógeno gris y verde.
- Cálculos matemáticos para conocer la cantidad de hidrógeno y nitrógeno necesarios para obtener amoníaco, la cantidad de amoníaco necesario para producir nitrato de amonio, las emisiones liberadas y los costos de producción en las etapas claves en la fabricación del ANFO. Además, de realizar la proyección absoluta, porcentual, logarítmica y lineal para proyectar la cantidad de nitrato de amonio producido en Chile durante los próximos 10 años, con el fin de obtener las emisiones de dióxido de carbono y costos de producción futuras. Finalmente, se realiza una evaluación económica para calcular el VAN, TIR,

periodo de recuperación, y la razón beneficio/costo, con el fin de determinar qué tan rentable es invertir en la producción del hidrógeno verde utilizando energía renovable.

1.7 Resultados esperados

El principal resultado que se quiere obtener al final del estudio es demostrar que la fabricación del explosivo ANFO, mediante la incorporación a sus componentes de fabricación del hidrógeno verde, es una solución sustentable y económicamente rentable para ser implementado en las tronaduras de minería a cielo abierto y subterránea. Además, conocer mediante estimaciones los costos de producción del hidrógeno verde y en qué año disminuirá lo suficiente para ser una competencia en términos económicos para el hidrógeno gris, sabiendo que actualmente el hidrógeno gris sigue siendo aún más económico que el hidrógeno verde.

Finalmente, lo que se pretende con este estudio es evaluar las emisiones liberadas en cada una de las etapas claves para la fabricación del ANFO, resultando ser el ANFO a partir de hidrógeno verde el que menos contamine el medio ambiente. Con el fin de que a futuro la fabricación del ANFO sea en su totalidad con hidrógeno verde, y la minería chilena sea cada vez más parte del cuidado del medio ambiente.

1.8 Organización del documento

Dentro del capítulo 2 se presenta el marco teórico enfocado a la comprensión de los conceptos y de la teoría aplicada dentro del estudio, incluyendo el proceso de tronadura que se realiza en minería subterránea y cielo abierto, las características de los explosivos que se deben considerar para su elección, descripción de las fuentes de energía utilizadas en el presente estudio, y definir cada uno de los elementos o compuestos necesarios para la fabricación del ANFO.

Luego, en el capítulo 3 se describe el ANFO, sus aplicaciones dentro del área minera, y las etapas claves para el proceso de fabricación del ANFO. Incluyendo, la descripción y emisiones liberadas en el proceso de obtención del hidrógeno gris y verde, amoníaco gris y verde, nitrato de amonio, y finalmente el ANFO.

En el capítulo 4, se realiza un caso de estudio en base a la producción anual de ENAEX (único productor de nitrato de amonio en Chile) durante los años 2013 y 2020, con la finalidad de obtener proyecciones de la producción anual que será en los próximos 10 años, y así calcular la cantidad de gases contaminantes que se liberaran en cada una de las etapas claves de los procesos de fabricación del nitrato de amonio, en caso de utilizar el hidrógeno gris o verde. Además, de realizar

una evaluación económica para una planta generadora de hidrógeno verde, capaz de producir la cantidad de hidrógeno verde necesaria para suministrar plantas de amoniaco, y cumplir con la demanda de nitrato de amonio dentro de los próximos 10 años.

Finalmente, en el capítulo 5 se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo 4, tal como la comparación entre las emisiones liberadas en cada una de las etapas claves para obtener nitrato de amonio, y los resultados obtenidos tras el desarrollo de la evaluación económica mediante el flujo de caja.

2 Marco Teórico

2.1 Tronadura

Previamente a los procesos de tronadura que se desarrollan en minería, se deben realizar las perforaciones adecuadas en el macizo rocoso basadas en un diagrama de perforación. Este diagrama de perforación es un proceso fundamental por desarrollar, debido a que son las zonas en donde se introducirán todas las cargas explosivas y sus respectivos accesorios de iniciación para proceder con la etapa de tronadura.

El objetivo de la tronadura es fragmentar una sección en específico de la roca. Por lo que se pretende maximizar la energía que se libera a causa del explosivo para la fragmentación y al mismo tiempo minimizar dicha energía por el lado contrario, con el fin de evitar generar grandes daños en la zona de trabajo.

2.1.1 Explosivos

El explosivo es el producto químico capaz de liberar grandes cantidades de calor y de gases que generan una elevadísima presión o radiación a una velocidad y tiempo inmediato a causa de cualquier acción externa que se presente, como el roce, calor o percusión. Estos explosivos son una de las sustancias más utilizadas en la industria minera, por lo que su elección se debe regir en base a una serie de características para escoger el que más se adecue al uso que se le quiere brindar.

A continuación, se presentan las características por considerar:

- Potencia
- Velocidad de detonación
- Densidad del explosivo
- Presión de detonación
- Resistencia al agua
- Toxicidad
- Sensibilidad
- Estabilidad química

Los explosivos a su vez pueden clasificarse de tres maneras indicadas en la figura 2.1.



Figura 2.1: Clasificación de los explosivos industriales.

Fuente Imagen: (Chacon, 2018).

2.2 Fuentes de energía renovable

2.2.1 Energía Solar

La energía solar es una fuente de energía renovable e ilimitada proveniente de la luz solar que se encuentra dentro del sistema solar, llegando aproximadamente a la superficie terrestre 178.000 terawatts por año (Ordóñez, 2009), significativamente mayor de lo que se consume actualmente en todo el mundo. De hecho, toda la energía solar que llega al planeta Tierra no se aprovecha de manera eficiente para la generación de electricidad, un gran ejemplo es Estados Unidos, que solo ocupa menos del 2% de electricidad producida mediante la energía solar.

La obtención de electricidad mediante la energía solar puede clasificarse de dos formas, solares térmicos y solares fotovoltaicos, las cuales se explicarán a continuación.

2.2.1.1 Energía solar térmica

La energía solar térmica se basa en la obtención de energía térmica (calor) a través de la energía que suministra el sol al planeta Tierra, la energía solar. Esta forma de obtención de calor se considera una fuente de energía renovable, por lo que no contamina el medio ambiente, siendo altamente sustentable.

Su obtención se puede comprender a través del siguiente esquema de la figura 2.2:

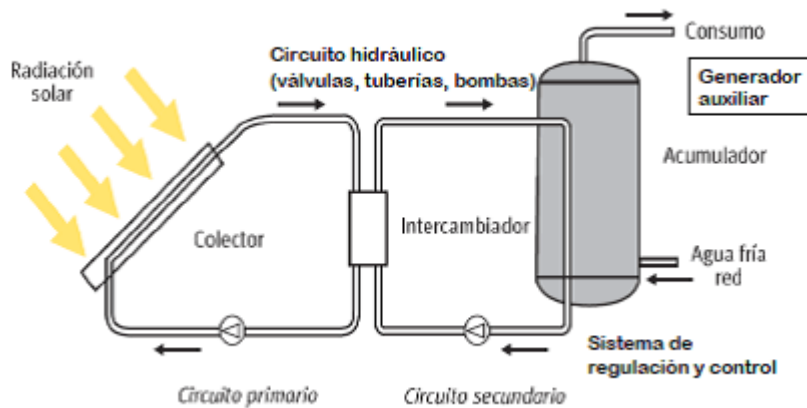


Figura 2.2: Esquema de la energía solar térmica.

Fuente Imagen: (Rivas, 2020).

En donde se puede apreciar que existe un circuito primario y secundario. El primero corresponde a la obtención de calor mediante los paneles solares que son los que captan la radiación solar, actuando como captadores. Además, contiene un circuito hidráulico, ya sean válvulas, tuberías o bombas, para hacer circular el agua que será calentada en el captador. Mientras que para el circuito secundario se realiza un intercambio de calor que será acumulado para su posterior consumo (Rivas, 2020).

Dicha fuente de energía presenta una serie de aspectos positivos, como también negativos. Los cuales se pueden apreciar en la tabla 2.1, a continuación:

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de la energía solar térmica. Fuente Tabla: (López-Cózar, 2006) (Energía, s.f.).

Ventajas	Desventajas
No emite gases contaminantes que puedan dañar la salud, ni de efecto invernadero que puedan causar un cambio climático.	Periodo largo para desarrollar las instalaciones de una central.
Energía autónoma e inagotable.	Uso de terrenos extensos.
Sus instalaciones no dejan huella ecológica al finalizar el proyecto.	Dependencia de la luz solar, la cual no siempre está presente.
No produce desperdicios o residuos difíciles de eliminar.	
Ahorro en el consumo eléctrico.	
Recuperación de los costos de instalación a medio plazo.	

2.2.1.2 Energía solar fotovoltaica

En la figura 2.3 se puede apreciar que el efecto fotovoltaico se basa en la generación de electricidad gracias a la radiación solar que llega a una celda solar, y pasa por medio de dos materiales semiconductores (materiales que conducen la electricidad). En donde uno es capaz de ceder y el otro de aceptar electrones, llamados tipo N y P, (Negativo y Positivo) respectivamente. Por lo que al iluminar la superficie que se encuentra entre los materiales tipo N y P, se genera el efecto fotovoltaico.

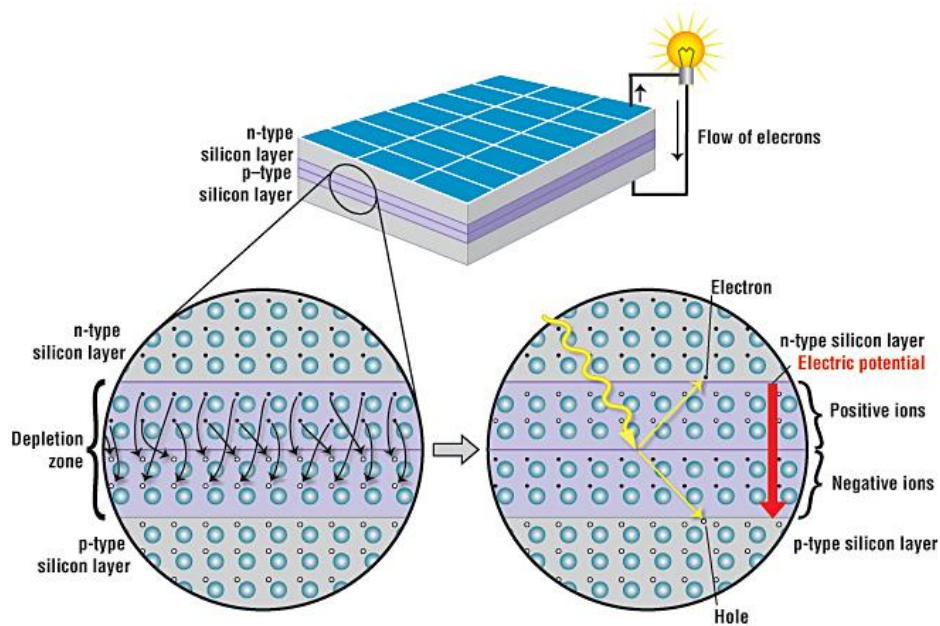


Figura 2.3: Esquema representativo de la energía solar fotovoltaica.

Fuente Imagen: (ACS Chemistry for life., s.f.).

Aunque, estas pueden presentar las siguientes ventajas y desventajas que se pueden ver en la tabla 2.2:

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica. Fuente Tabla: (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación., 2002).

Ventajas	Desventajas
Limpia, renovable, infinita, silenciosa.	Gran inversión inicial.
Retribuida económicamente la producción para venta a red.	Difícil almacenamiento.
Subvencionables.	Proceso de fabricación de módulos complejo y caro
Corto <i>pay-back</i> de la energía.	No competitiva con otras energías en la actualidad.
Sin partes móviles y modular.	Producción variable según climatología y época del año.

2.2.2 Energía Eólica

La energía eólica es una forma limpia y sustentable para poder obtener electricidad convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica, utilizando molinos. Estos, tienen tres hélices en la parte superior del mástil, los cuales tendrán una forma adecuada con el fin de evitar torbellinos y maximizar la diferencia de presiones generadas. Las cuales irán girando en función del movimiento del aire (energía cinética) que fluye entre ellas, generando una diferencia de presiones lo que resultará en dos tipos de fuerza (Figura 2.4). La primera es de sustentación, en donde la fuerza que se genera tiene una dirección perpendicular al viento. Mientras que la segunda fuerza es de arrastre la que toma una dirección paralela al viento. Debido a este movimiento se genera energía mecánica, la que será trasladada por un eje giratorio de bucles de alambre de cobre, los que convierten finalmente esta energía en electricidad. Además, esta electricidad es pasada por un transformador para incrementarla y ser llevada a través de cables, junto a la energía recaudada de otros molinos, hacia una subestación eléctrica. Con la finalidad de utilizarla de las distintas formas que se ocupan hoy en día.

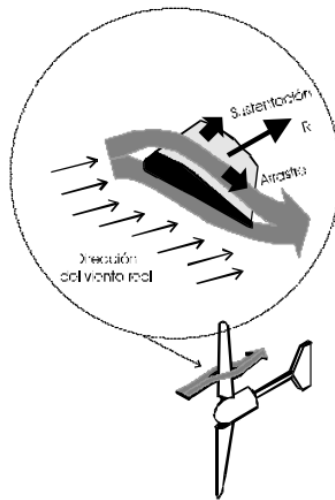


Figura 2.4: Fuerzas de sustentación y de arrastre.

Fuente Imagen: (Moragues & Rapallini , 2003).

Con respecto a sus ventajas y desventajas que presenta dicha fuente de energía, estas se presentan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de la energía eólica. Fuente Tabla: (López, 2013).

Ventajas	Desventajas
No emite gases contaminantes al medio ambiente y tampoco utiliza agua.	Depende de la velocidad y dirección del viento, siendo pocos lugares del mundo aptos para generar energía eólica.
Reduce las emisiones de CO ₂ .	Requiere de mayor potencia rodante.
No causa riesgos ambientales de gran impacto.	Alto nivel de ruido.
Periodo de recuperación energética pequeño.	Impacto sobre la fauna (aves) y paisajístico.
	Produce interferencias con campos electromagnéticos.

2.3 Hidrógeno

El hidrógeno es un gas que se encuentra en abundancia en la Tierra, aproximadamente en un 90% del universo. Es el primer elemento químico de la tabla periódica, simbolizado con la letra H, y en la parte superior izquierda con un valor de 1 una correspondiente a su masa atómica (Figura A.2). Dentro de sus características fundamentales, se encuentra la acción de poder ser utilizado para la generación de energía para los diversos usos que se requieren en todo tipo de industrias, incluso triplicando la cantidad de energía generada por medio de combustibles fósiles (Ver tabla 2.4), y sin dejar de lado la importancia que tiene el hidrógeno en ser un recurso renovable y sustentable, por lo que no causa daños al medio ambiente en su proceso de uso, excepto en su fabricación a partir de hidrocarburos.

Tabla 2.4: Comparación del contenido de energía en distintos tipos de combustibles. Fuente Tabla: (Olabi, y otros, 2020).

Combustible	Contenido de energía [MJ/kg]	
	Valor mínimo de calefacción	Valor máximo de calefacción
Hidrógeno gaseoso	119,96	141,88
Hidrógeno líquido	120,04	141,77
Gas natural	47,13	52,21
Gas natural licuado	48,62	55,19
Gas licuado de petróleo	46,60	50,14
Petróleo crudo	42,68	45,53
Still gas (en refinerías)	46,89	50,94
Gasolina convencional	43,44	46,52
Reformulado o bajo en azufre	42,35	45,42
Diésel convencional	42,78	45,76
Diésel bajo en azufre	42,60	45,56
Carbón (base húmeda)	22,73	23,96
Carbón para cocinar (base húmeda)	28,60	29,86
Carbón bituminoso (base húmeda)	26,12	27,26
Etanol	26,95	29,84
Metanol	20,09	22,88

La producción de hidrógeno tiene cuatro grandes procesos, los cuales son la electrólisis, el reformado, gasificación y por medio de microalgas. Realizar cualquiera de estos cuatro métodos de producción de hidrógeno molecular requiere de la alimentación de una fuente de energía, la cual puede ser una energía renovable, nuclear o de combustibles fósiles. Pero, cada una de estas fuentes de energía tiene grandes diferencias en los ámbitos positivos o negativos que pueden generar al medio ambiente, como también en el producto final. Es decir, en el caso de obtener hidrógeno por medio del reformado de metano con vapor de agua utilizando una energía en base

a combustibles fósiles, se obtendrá un hidrógeno gris, es decir, no sustentable y su fabricación producirá CO₂. Mientras que la producción de hidrógeno a través de la electrolisis utilizando energía renovable, como lo es la eólica, se obtendrá hidrógeno verde y su fabricación solo producirá moléculas de agua en un estado gaseoso, debido a la ruptura de sus componentes.

Aunque, tal como se muestra en la figura 2.5, no se puede utilizar para un proceso de producción de hidrógeno cualquier fuente de energía, sino que cada proceso tiene sus limitaciones. Como, por ejemplo, la electrólisis, tal como su nombre lo indica busca la ruptura de la molécula de agua mediante la energía eléctrica. Mientras que la gasificación realiza la misma tarea, pero con energía de la biomasa.

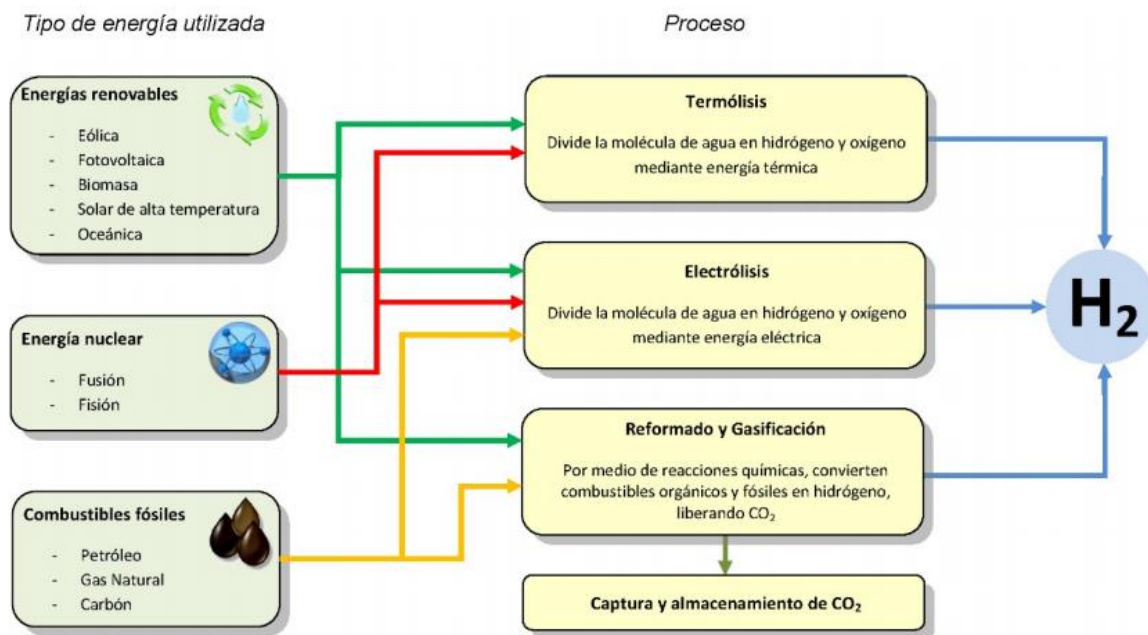


Figura 2.5: Esquema de los distintos procesos de producción del hidrógeno en base a una variedad de fuentes de energía utilizadas.

Fuente Imagen: (Bonnin, 2019).

2.4 Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento químico que se encuentra en la tabla periódica bajo el símbolo N, número atómico igual a 7 y una masa atómica de 14 uma (Figura A.2). Se caracteriza por ser un gas incoloro, inodoro e inerte, que se encuentra en abundancia en la atmósfera de la Tierra, aproximadamente en un 80% de esta. Aunque también se puede encontrar en un estado de combinación (nitratos, urea, amoníaco, etc), siendo una de las moléculas más importantes para el crecimiento de los seres vivos. Además, sus aplicaciones tienen gran relevancia en el área de

electrónica, alimentos y bebidas, laboratorios, aplicaciones marinas, prevención de incendios y del petróleo y gas (Atlas Copco, s.f.).

Para poder obtenerlo y ser aplicado en las áreas mencionadas anteriormente, existen distintas maneras, en donde su selección se basa en la cantidad de producción que se requiere para un determinado proyecto. Estos métodos son (Atlas Copco, s.f.):

- Licuefacción y destilación del aire.
- Comprimir el aire.
- Suministro del gas nitrógeno en botellas de alta presión.
- Oxidación del amoniaco.
- Descomposición del nitrato de amonio.

Aunque hoy en día la mayor cantidad de empresas que requieren de nitrógeno, no buscan tener un proveedor de este, sino que fabrican su propio nitrógeno en base a las cantidades que necesiten y mediante el proceso de compresión del aire.

2.5 Amoniaco

El amoniaco (NH_3) es un compuesto químico incoloro que se obtiene a través de la mezcla de dos gases reactivos, el hidrógeno y nitrógeno, representada en la ecuación 1:



A través del proceso llamado Haber – Bosch, el cual se describirá más adelante. Con el fin de poder ser utilizado para la producción de fertilizantes, alimentos, productos comerciales, e incluso para las plantas, entre otras aplicaciones.

2.6 Ácido Nítrico

El ácido nítrico (HNO_3) es un compuesto formado por 1,6% de hidrógeno, 22,23% de nitrógeno y 76,17% de oxígeno, y cuyo peso molecular es 63,02 g/mol. Este es un compuesto comúnmente utilizado en colorantes, fertilizantes, fibras, plásticos y como es el caso actual, en explosivos (UNAM, 2016). Para este último, el ácido nítrico es una de las materias primas para la producción de nitrato de amonio, el cual forma parte de un 94% del ANFO, explosivo utilizado en grandes cantidades por la industria minera.

2.7 Combustible

En la fabricación del ANFO, aproximadamente un 6% de sus componentes corresponde al combustible, comúnmente usado el diésel. Presentando las siguientes características vistas en la tabla 2.5:

Tabla 2.5: Propiedades físicas y químicas del diésel. Fuente Tabla: (Chacón, 2016).

Propiedades	Descripción
Olor	Característico del petróleo
Apariencia	Claro y brillante
Punto de inflamación	52°C mín.
Presión de vapor	0,5 kPa a 40°C
Densidad relativa	0,9 g/mL
Solubilidad en agua	Insoluble
Propiedades explosivas	Puede formar mezclas de vapor – aire explosivas/inflamables
Punto de ebullición	150°C
pH	Neutro
Estabilidad química	Estable
Incompatibilidad con otros materiales	Agentes oxidantes fuertes, ácidos fuertes y productos cáusticos.
Productos de la descomposición	CO ₂ (CO, HC y otros productos pueden desprenderse bajo combustión incompleta)

2.8 Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son provenientes de la mezcla entre el nitrógeno y oxígeno. De los cuales pueden resultar los siguientes (Ministerio del Medio Ambiente, 2016):

- Óxido de nitrógeno (Óxido nítrico) (NO).
- Dióxido de nitrógeno (NO₂).

- Trióxido de nitrógeno (NO_3).
- Óxido de dinitrógeno (Óxido nitroso) (N_2O).
- Pentóxido de nitrógeno (N_2O_5).

Estos compuestos tienden a causar grandes daños hacia la atmosfera, como la destrucción del ozono estratosférico, lluvia acida (contacto entre el óxido nítrico y la humedad), nubes toxicas sobre la ciudad, lo que por consiguiente causa enfermedades respiratorias y pulmonares en la salud de las personas (Motor y Movilidad, 2019).

2.9 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas de origen natural, incoloro, inodoro e incombustible, que es producido por la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) para sectores como el transporte, sector energético, y producción industrial. Por lo que es el principal causante del efecto invernadero en el mundo, produciendo graves daños a la salud de las personas, cambios climáticos, y contaminaciones (Benito, 2016).

2.10 Planta generadora de hidrógeno verde

Una planta de hidrógeno verde requiere principalmente de los siguientes equipos para su funcionamiento:

- Purificador de agua.
- Tanque de almacenamiento de agua.
- Electrolizador.
- Compresor.
- Tanque de almacenamiento de hidrogeno.

Además, de materias primas como el agua, oxígeno y una fuente de energía renovable.

Su funcionamiento comienza en el proceso de purificación del agua antes de su almacenamiento, en donde se debe lograr trabajar con los parámetros de ASTM, específicamente de tipo I y II, dependiente al tipo de industria enfocada, es decir, el agua deberá tener cierto nivel de pH, sodio, silicio, cloro, resistividad eléctrica, bacterias, entre otros. Luego de ser purificada, por medio de una bomba es dirigida a un tanque de almacenamiento, el cual estará conectado y suministrando

agua al electrolizador. Este, al mismo tiempo estará recibiendo oxígeno proveniente del aire y energía eléctrica renovable, para producir hidrógeno verde. Este flujo de salida del electrolizador (hidrógeno verde), alimenta un compresor que tendrá el objetivo de comprimir este hidrógeno a una presión definida dependiendo del equipo a utilizar, para su posterior almacenamiento y transporte (Figura 2.6) (Bórquez, 2013).

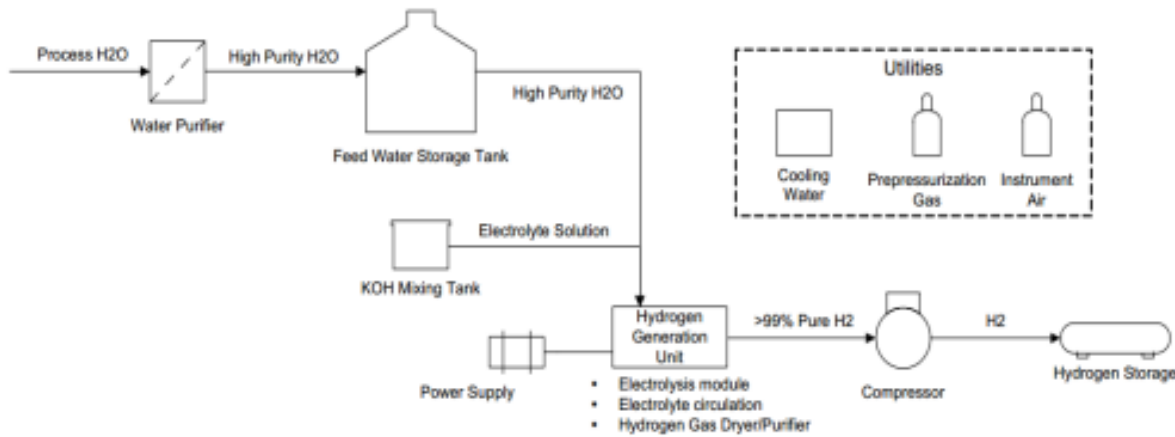


Figura 2.6: Esquema proceso de producción con un electrolizador alcalino.

Fuente Imagen: (Bórquez, 2013).

2.11 Proyecciones

Las proyecciones se realizan en casos cuando se requiere estimar numéricamente lo que ocurrirá a futuro. En el caso de proyectar las ventas de un negocio, esto comúnmente se refiere a estimar cuáles serán las ventas diarias, semanales, mensuales o anuales. Pero, en el caso presente de esta memoria, las proyecciones serán utilizadas para estimar la cantidad de nitrato de amonio anual dentro de 10 años. Y esto se puede llevar a cabo por medio de cuatro métodos: Proyección absoluta, porcentual, logarítmica y lineal.

2.11.1 Proyección Absoluta

La proyección absoluta consiste en obtener el valor futuro deseado a partir de valores numéricos pasados que se tienen por medio del promedio de las diferencias entre estos. Por lo que, para esto, primero se debe calcular el incremento absoluto, el cual es la diferencia entre un valor determinado y el anterior mediante la ecuación 2:

$$\Delta_n = V_n - V_{n-1} \quad (2)$$

Teniendo los valores de todos los incrementos absolutos, se calcular la media aritmética de estos resultados mediante la ecuación 3:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n \Delta_i}{n-1} \quad (3)$$

Finalmente, el promedio de todos los incrementos absolutos calculados es el valor que se le agrega a lo que corresponde numéricamente al último año (Fagilde, 2009).

2.11.2 Proyección Porcentual

La proyección porcentual consiste en primero calcular los incrementos porcentuales cuando se tienen valores reales del pasado, esto se realiza por medio de la ecuación 4:

$$\Delta\%_n = \frac{V_n - V_{n-1}}{V_{n-1}} \times 100 \quad (4)$$

Al igual como el método anterior, una vez se tienen todos los incrementos porcentuales, se debe calcular la media aritmética de este con la ecuación 5:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i^n \%_i}{n-1} \quad (5)$$

Finalmente, el promedio de todos los incrementos porcentuales calculados es el valor que se le agrega a lo que corresponde numéricamente al último año (Fagilde, 2009).

2.11.3 Proyección Logarítmica y Lineal

El método de proyección algorítmica consta en obtener la ecuación logarítmica de los valores reales que se tienen, para calcular el valor futuro en base a esta ecuación. Mientras que la proyección lineal, es exactamente lo mismo, pero en base a una ecuación lineal. Estas pueden ser de la siguiente manera, como se muestra en la ecuación 6 y 7 (Fagilde, 2009):

1. Ecuación logarítmica

$$y = \ln(x) * b + c \quad (6)$$

2. Ecuación lineal

$$y = (m * x) + b \quad (7)$$

2.12 Evaluación de proyectos

La evaluación de proyectos tiene la finalidad de permitir estimar con un criterio acorde, la posibilidad que tiene un proyecto de llevarse a cabo. Esto, puede abarcar entre nuevos negocios o incluso mejoras, cambios o modernización dentro de una empresa ya establecida. Y para esto, se requiere de una serie de pasos para que el inversionista tome la decisión correcta si seguir o abandonar la idea en cuestión, en base a la comparación entre los costos y beneficios económicos (Chaín, 2007).

2.12.1 Etapas de un proyecto.

Las etapas de un proyecto se dividen en cuatro partes, la idea, pre-inversión, inversión, y operación (Ver figura 2.7).

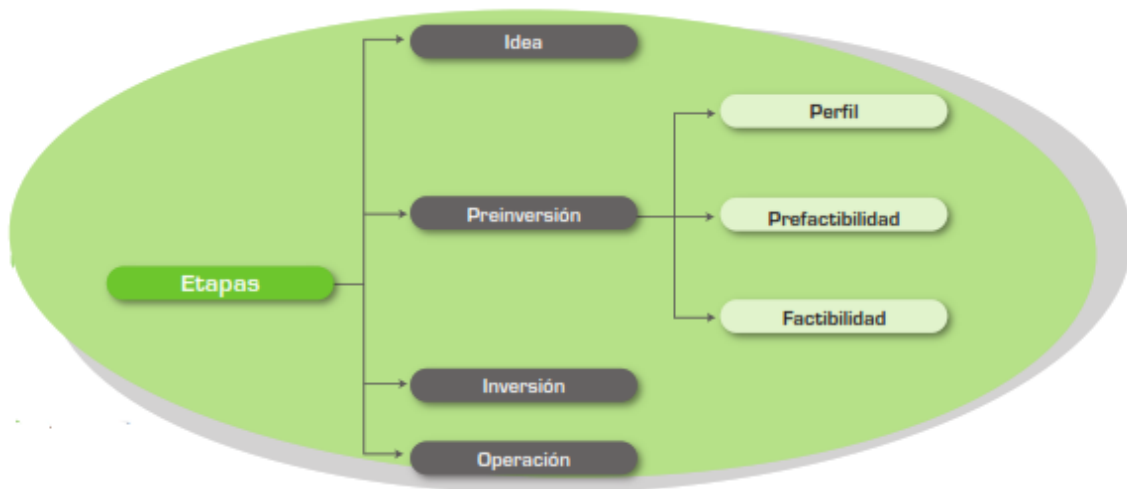


Figura 2.7: Etapas de un proyecto.

Fuente Imagen: (Chaín, 2007).

– *Etapa de idea*

Dentro de las etapas de un proyecto, la idea es el primer paso por definir, el cual tiene la finalidad de encontrar nuevas oportunidades de negocio dentro o fuera de empresas ya establecidas, o mejoramientos dentro de una empresa, basándose en la búsqueda de soluciones a problemáticas para obtener un beneficio a futuro. Ejemplos de oportunidades dentro de una empresa puede ser la ampliación para aumentar la productividad, problemáticas que pueden enfrentar las empresas son las dificultades para abastecerse de insumos que limitan la producción, y ejemplos de oportunidades para dar solución a un problema es la creación de hospitales cercana a zonas rurales (Chaín, 2007).

– *Etapa de pre-inversión*

En la etapa de pre-inversión se realiza un estudio de viabilidad económica de la idea definida en la etapa anterior y la cual se pretende llevar a cabo. Esta, se puede llevar a cabo de tres maneras distintas, perfil, prefactibilidad y factibilidad. La cual dependerá de la cantidad y calidad de información, es decir, si se tiene una menor cantidad y calidad de información se deberá realizar un estudio nivel de perfil, si no, será un estudio a nivel de factibilidad.

El estudio a nivel perfil tiene la finalidad de tomar decisiones en base a información secundaria, es decir, basándose en estudios ya realizados para tomar una decisión antes de verse en la necesidad de realizar gastos mayores en estudios que proporcionen mejor dicha información.

En el estudio a nivel prefactibilidad se realiza una estimación de los costos y beneficios de un proyecto a largo plazo, mediante un flujo de caja, basándose en información secundaria (Chaín, 2007).

Finalmente, el estudio a nivel de factibilidad se asemeja bastante al nivel de prefactibilidad, dado a que, estimado los costos y beneficios a largo plazo, mediante un flujo de caja, pero con la única diferencia que, en este caso, la información es de tipo primario, es decir, demostrativa (Chaín, 2007).

– *Inversión*

La etapa de inversión de un proyecto se realiza después que se comprobó en la etapa de pre-inversión lo económicamente rentable que es un proyecto, lo que llevará al inversionista en un futuro a tener altos beneficios económicos. Por ende, en esta etapa se concreta el proyecto y se realizan las inversiones necesarias antes de ser puesto en marcha (Chaín, 2007).

– *Operación*

La etapa de operación de un proyecto es cuando se ejecuta la inversión de un proyecto, es decir, se inician las construcciones necesarias o el uso de un equipo nuevo para aumentar la producción, etc. Lo cual puede variar dependiendo de la idea de proyecto que se está enfrentando (Chaín, 2007).

2.12.2 Ingresos y egresos

Los ingresos se definen como todo aquel beneficio económico que tenga la empresa tras realizar una inversión, es decir, todo lo que incremente la riqueza del inversionista. Estos, se pueden dividir en los ingresos que tiene la caja y los que no constituyen ingresos a la caja. El primero, se subdivide en todas las ventas de producto, activos, residuos, subproductos, y ahorro de costos. Mientras que el segundo, corresponde al valor de desecho del proyecto, recuperación de la inversión en capital de trabajo (Ver figura 2.8) (Chaín, 2007).



Figura 2.8: Beneficios de un proyecto.

Fuente Imagen: (Chaín, 2007).

Por el lado contrario, dentro de un proyecto también existen los egresos. Estos, se definen como todo aquel costo que no conlleve un beneficio para la empresa. Los cuales se pueden dividir en dos partes, los costos involucrados en la inversión (todo gasto necesario para efectuar un proyecto), y aquellos costos que se deben llevar a cabo dentro de la operación de un proyecto (todo gasto que se debe realizar para mantener en desarrollo el proyecto, y son deducibles de impuesto) (Chaín, 2007).

2.12.3 Inversiones

La inversión se define como el conjunto de gastos necesarios para que el proyecto comience el funcionamiento de sus operaciones. Estos, se realizan en el año cero de la línea de tiempo del proyecto e involucran gastos como (Chaín, 2007):

- Estudios de viabilidad.
- Adquisición de activos.
- Planos.
- Terrenos.
- Licencias.
- Construcción de infraestructuras.
- Instalaciones fijas, entre otras.

2.12.4 Depreciación

La depreciación es la pérdida anual que tiene un activo correspondiente a la pérdida contable de valor promedio de un activo fijo por año transcurrido. El cual puede ser calculado mediante la ecuación 8 (Chaín, 2007):

$$D = \frac{V_{\infty}}{n} \quad (8)$$

En donde:

- D: Depreciación anual.
- V_{∞} : Valor total de adquisición del activo
- n: número de años en que el activo puede ser depreciable (vida útil).

2.12.5 Valor libro

El valor libro corresponde a lo que falta por depreciar de un activo en el momento de su venta, y puede ser calculado mediante la diferencia entre el valor de adquisición del activo y la depreciación acumulada al momento de realizarse la venta (Chaín, 2007).

2.12.6 Valor de desecho económico

El valor de desecho calculado por el método económico corresponde al valor que una empresa está dispuesta a vender en un futuro el proyecto en cuestión. Este generalmente se calcula en el último momento dentro de su periodo de evaluación, esto quiere decir que, si se tiene que evaluar un proyecto de 10 años, el décimo año es el que mejor representa lo que podría suceder en los próximos años. Su valor puede ser calculado mediante la ecuación 9 (Chaín, 2007):

$$VD_e = \frac{FC_p}{i} \quad (9)$$

En donde:

- VD_e : Valor de desecho económico.
- FC_p : Flujo de caja promedio perpetuo anual.
- i : Tasa de ganancia exigida al proyecto.

2.12.7 Capital de trabajo

El capital de trabajo corresponde al total de recursos que un proyecto en cuestión requiere para operar de manera continua, considerando que hay algunos que son irrelevantes para tomar la decisión de llevar a cabo o no, un proyecto. Este se calcula a través de un porcentaje definido del total de los egresos del primer año de un proyecto (Chaín, 2007).

2.12.8 Tasa de rendimiento mínimo aceptable

La tasa de rendimiento mínimo aceptable (TREMA) se representa como porcentaje y corresponde a lo mínimo exigido de un proyecto para cubrir el total de las inversiones realizadas. En el este estudio, se asume una TREMA de 16% (Chaín, 2007).

2.12.9 Valor Actual Neto

El valor actual neto (VAN) corresponde a un valor numérico que representa la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión. Mediante el cálculo del valor actual de todos los flujos de caja, a partir del primer año, y restando la inversión inicial efectuada en el año cero. El resultado dependerá de qué tan factible puede llegar a ser un proyecto en el periodo de tiempo evaluado, y puede ser negativo, cero o positivo. En el caso de ser (Chaín, 2007):

- Negativo, el monto representará lo que falta para ganar la tasa que se deseaba obtener después de ser recuperada la inversión.
- Cero, el proyecto reporta exactamente la tasa de interés que se quería obtener después de recuperar el capital invertido.
- Positivo, el monto representa cuánto se gana con el proyecto, después de recuperar la inversión, por sobre la tasa de interés que se exigía de retorno al proyecto.

2.12.10 Tasa Interna de Retorno

La tasa interna de retorno (TIR) se mide en porcentaje, y corresponde a qué tan rentable es un proyecto (Chaín, 2007).

2.12.11 Periodo de recuperación

El periodo de recuperación de un proyecto corresponde al tiempo que se tarda la idea en recuperar la inversión, incluyendo los factores necesarios para llevar a cabo el proyecto (Chaín, 2007).

2.12.12 Relación beneficio-costos

La relación beneficio-costos realiza una comparación entre el valor actual de los beneficios proyectados y el valor actual de los costos, incluyendo la inversión, y se puede calcular mediante la división entre el total del beneficio y el total de los costos, en un proyecto (Chaín, 2007).

3 Ammonium nitrate fuel oil

3.1 Descripción

El *ammonium nitrate fuel oil* (ANFO) es un explosivo químico, donde existe una mezcla entre oxidantes (nitrato de amonio) y elementos provenientes del combustible fósil. Se clasifica como un agente de tronadura seco (componentes no explosivos), específicamente como nitrocarbonitratos, por tener como principal materia prima al nitrato de amonio (oxidante) en su fabricación, al ser aproximadamente un 94% que lo conforma y lo restante como petróleo. Este, tiene una forma de perlas cuyas dimensiones están entre 1 a 3 mm de diámetro (Ver Figura 3.1), mala resistencias al agua, una baja densidad y un nivel de porosidad nula. Son estas características del nitrato de amonio, el que permite absorber en cantidades necesarias el combustible, siendo lo mínimo y máximo de absorción un 6% y 12% de combustible (petróleo), respectivamente, para lograr un buen rendimiento en la detonación (INACAP, s.f).



Figura 3.1: Perlas de ANFO (Mezcla de Nitrato de Amonio y petróleo).

Fuente Imagen: (INACAP, s.f).

En la tabla 3.1 se aprecian las principales características del ANFO.

Tabla 3.1: Principales características del ANFO. Fuente Tabla: (Abellán, 2013).

Densidad	0.80 – 0.95 g/cm ³
Potencia	70 – 80 %
Resistencia al agua	Muy mala
Velocidad de detonación	Mayor de 4000 m/s
Sensibilidad	Baja

Además de tener bajos costos de producción y venta, alto nivel de seguridad en su manipulación y transporte, y de ser uno de los explosivos con mayores fuentes de energía explosiva entregando altos rendimientos energéticos en sus resultados. Aunque, por el lado negativo, dicho explosivo tiene una muy mala resistencia al agua, lo que afecta directamente a la potencia de este (Sangay, 2014).

3.2 Clasificación

Los ANFOs se clasifican en tres grandes grupos, estos son:

3.2.1 ANFO Aluminizado

El ANFO común generalmente se le agrega aluminio cuando sus características presentan tener una baja densidad, esto se debe a que el aluminio al ser un combustible altamente energético y al ser agregado a la mezcla, permite que el ANFO pueda aumentar su densidad y, por consiguiente, su energía, velocidad de detonación, poder rompedor y sus otras características (Sangay, 2014).

En la tabla 3.2, se puede apreciar como ejemplo de esto, los resultados de las pruebas en la Mina Condestable al agregar aluminio a la mezcla de nitrato de amonio y petróleo. Por lo que se puede apreciar que, al existir un aumento del porcentaje de aluminio presente en el ANFO, existe también un aumento en la densidad, velocidad de detonación, entre otras.

Tabla 3.2: Propiedades del ANFO aluminizado en función del aluminio adicionado. Fuente Tabla: (Paredes, 2020).

Aluminio adicionado (%)	Contenido de nitrato de amonio, AN (%)	Contenido de petróleo, FO (%)	Propiedades del ANFO aluminizado cargado a una presión de 80 PSI				
			Densidad (g/cc)	Velocidad de detonación, VOD (m/s)	Calor de detonación (kCal/kg)	Volumen de explosión (l/kg)	Potencia relativa por peso, RWS (%)
0	94,57	5,43	0,995	4737,36	907,21	973,29	100
2	93,32	4,68	1,025	4902,51	984,01	940,21	106
4	91,75	4,25	1,040	5073,23	1062,68	910,66	113
6	90,34	3,66	1,090	5379,70	1140,41	879,35	120

3.2.2 ANFO Pesado

El ANFO pesado consiste en adicionar emulsiones al ANFO, las cual está compuesto principalmente por nitrato de amonio, nitrato de sodio, petróleo y un emulsificador (INACAP, s.f). Esto provoca que las principales características del explosivo se vean alteradas dependiendo del porcentaje de emulsión en la mezcla. Tal como se puede apreciar en la tabla 3.3, al aumentar el porcentaje de emulsión en la mezcla existe un aumento leve en la densidad del explosivo, la resistencia al agua cada vez mejora, y la velocidad de detonación aumenta solo hasta llegar a un nivel en donde comienza a disminuir.

Tabla 3.3: Propiedades del ANFO pesado en función de las emulsiones adicionadas. Fuente Tabla: (Sangay, 2014).

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
HA-37	30	70	1.05 (± 0.01)	4800 - 5000	Nula
HA-46	40	60	1.15 (± 0.01)	5000 - 5200	Baja
HA-55	50	50	1.27 (± 0.01)	5200 - 5400	Buena
HA-64	60	40	1.29 (± 0.01)	4500 - 4800	Excelente

3.2.3 ANFO Liviano

En los casos en donde se pretende disminuir la energía del ANFO, al igual como la densidad y como consecuencia la velocidad de detonación, potencia, entre otras características, se agrega a la mezcla de nitrato de amonio y petróleo (ANFO), la suficiente cantidad de poliestireno dependiendo de los resultados deseados, la aplicación que se le desea dar a este explosivo, o la ubicación en donde será explotado (INACAP, s.f).

3.3 Aplicaciones en minería

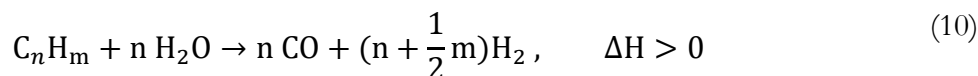
El ANFO es bastante utilizado en el área de minería, tanto para minería subterránea como cielo abierto, ya sea pequeña o mediana minería, para dar forma a galerías, romper y cortar paredes, entre otras labores. Es por esto, que grandes empresas mineras como Codelco, BHP Billiton y Anglo American utilizan en sus distintas faenas dicho explosivo debido a contratos que presentan con ENAEX, aun cuando estas no presenten las mismas condiciones (ENAEX, 2019). Ya que el ANFO puede ser fácilmente adaptado a las necesidades de cada faena agregando aluminio, poliestireno o emulsiones, para modificar sus principales características y cumplir con su objetivo.

En el caso de Codelco, algunas de sus faenas que utilizan el ANFO para sus procesos de tronadura son Chuquicamata y Radomiro Tomic (Codelco, s.f.). En el caso de la empresa BHP Billiton es la Mina Cerro Colorado y, en Anglo American la Mina Los Bronces y el Soldado (ENAEX, 2019).

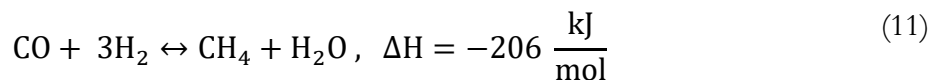
3.4 Procesos de fabricación – Obtención del hidrógeno

3.4.1 Obtención del hidrógeno a partir de del reformado de hidrocarburos

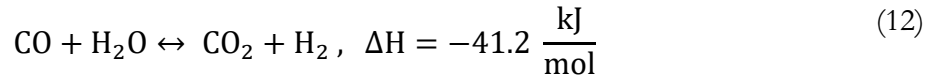
El reformado de hidrocarburos con vapor de agua es un proceso para poder obtener compuestos como H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , sobre un catalizador, usualmente níquel soportado sobre un óxido metálico. En donde, se aprecia la ecuación 10 de la reacción química que ocurre:



Correspondiente a una reacción inversa de la reacción endotérmica, es decir, absorción de calor. Luego, una reacción de metanación, es decir, la reacción entre monóxido de carbono con hidrógeno para formar metano y agua, tal como se muestra en la ecuación 11:



Finalmente, se transforma el monóxido de carbono en dióxido de carbono con la presencia de agua, tal como se muestra en la ecuación 12:



Como se puede apreciar en las ecuaciones 10, 11 y 12, y en la figura 3.2, el proceso de reformado de hidrocarburos con vapor de agua produce la descarbonilación y descarboxilación. Además, el proceso de hidratación en donde se presenta una molécula de hidrógeno unido a un ion hidroxilo a un carbono de doble enlace. El proceso de descarboxilación se basa en la eliminación de un carboxilo formando CO_2 . Y, el proceso de craqueo, correspondiente a la descomposición de un compuesto químico en uno más simple.

Finalmente, se debe tomar en consideración que para lograr obtener el H_2 y CO las reacciones químicas finales deben estar en equilibrio (Sánchez, 2007).

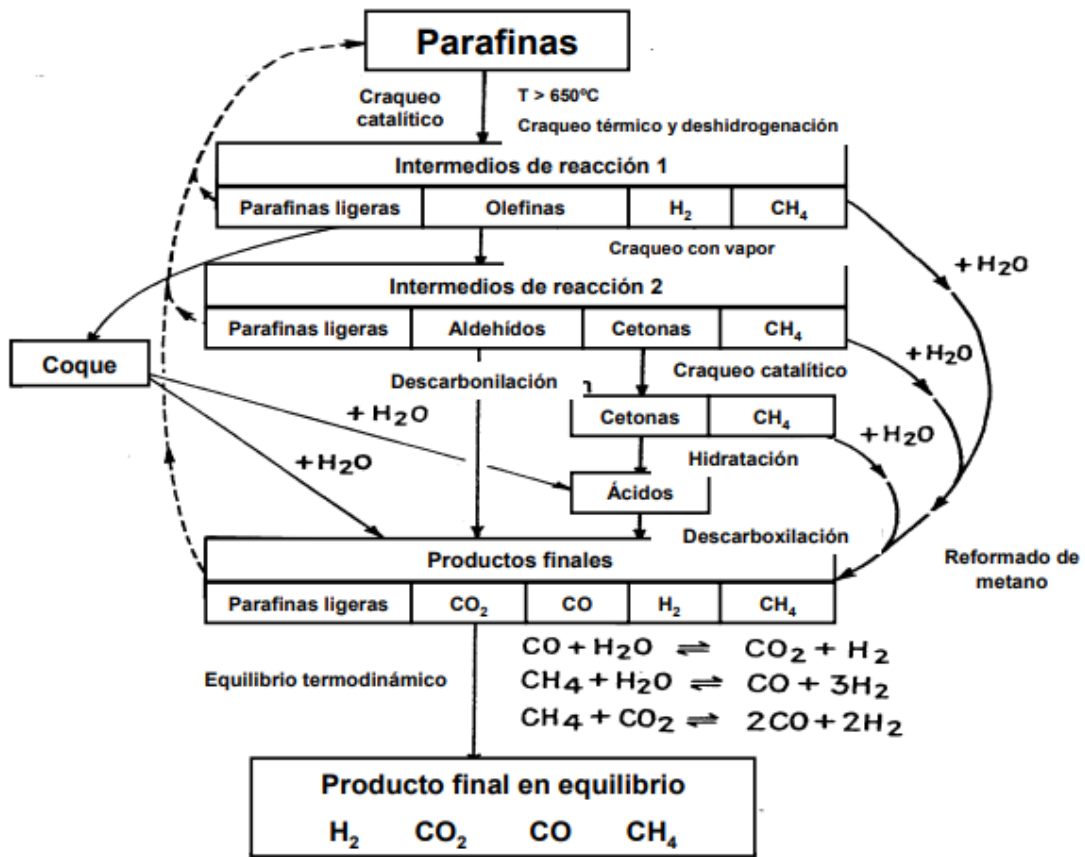


Figura 3.2: Reacciones en el proceso de reformado de hidrocarburos con vapor de agua.

Fuente Imagen: (Sánchez, 2007).

Las ventajas y desventajas para la obtención de hidrógeno mediante el reformado de hidrocarburos se presentan en tabla 3.4:

Tabla 3.4: Ventajas y desventajas del reformado de hidrocarburos. Fuente Tabla: (Vásquez & Salinas , 2018).

Ventajas	Desventajas
Alto rendimiento.	Complejidad del sistema.
Bajo costo.	Sensible a la calidad del gas natural.
Fácil de transportar y almacenar.	Genera emisiones de CO ₂ a la atmosfera.

3.4.1.1 Emisiones liberadas

Actualmente, existen una diversidad de fuentes de energía para la producción de hidrógeno por medio del reformado de hidrocarburos, pero las más comunes lo obtienen utilizando alguna energía basada en algún combustible fósil, tales como el carbón, petróleo o el gas natural. Los cuales son considerados dañinos para el medio ambiente por la gran cantidad de emisiones de CO₂ producidas, por lo que se obtiene un producto llamado “hidrógeno sucio” (Ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Clasificación del hidrógeno en hidrógeno limpio y sucio.

Fuente Imagen: (Badía, 2005).

En este caso, por cada tonelada de hidrógeno producido por el reformado de hidrocarburos con vapor de agua, se estarían liberando a la atmosfera 9,5 toneladas de dióxido de carbono (Figura 3.12) (Gaete, 2020).

3.4.1.2 Costos

Según la figura 3.4, el precio del hidrógeno gris levemente aumenta entre el año 2020 y 2050, redondeando los 2 USD/kg (Ministerio de Energía, 2020).

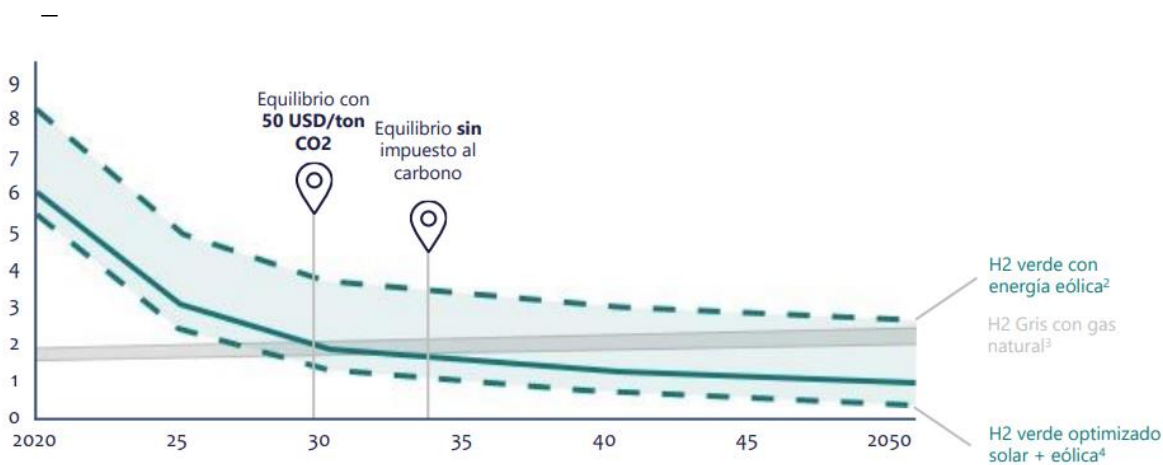


Figura 3.4: Costo de producción del hidrógeno gris y verde (USD/kg H₂).

Fuente Imagen: (Ministerio de Energía, 2020).

3.4.2 Obtención del hidrógeno a partir de recursos renovables

3.4.2.1 Energías renovables disponibles en Chile

En Chile, para la fabricación del ANFO sustentable se requiere inicialmente de la producción de un hidrógeno completamente nuevo, utilizando energía renovable para realizar la electrolisis del agua, y así el resultado final será totalmente sostenible, llamado hidrógeno verde. Como se ha mencionado en el capítulo 2, existen distintas fuentes de energías que son amigables con el medio ambiente, pero existen limitaciones en cuanto a la ubicación en donde pueden producir la energía logrando tener un alto rendimiento.

Por lo que, a continuación, se puede apreciar las distintas zonas en el mundo donde predomina cada fuente de energía renovable, dando un enfoque específico en Chile.

– Energía Solar

Según lo ilustrado en la figura 3.5 sobre la cartografía de radiación solar en el mundo, Chile tiene un potencial bastante alto para el uso de la energía solar en la zona norte y centro del país, siendo la zona norte con la más alta radiación solar del planeta (Ministerio de Energía, 2020).

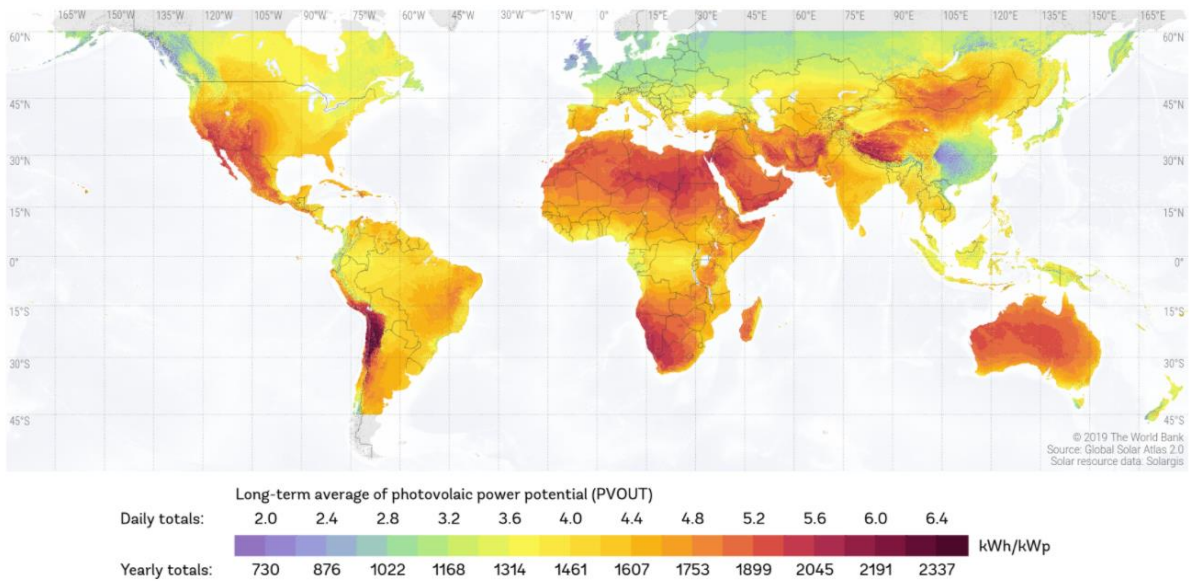


Figura 3.5: Cartografía de radiación solar.
Fuente Imagen: (Global Solar Atlas , 2019).

– Energía Eólica

Al igual que la energía solar, la energía eólica en Chile tiene un potencial alto para la obtención de electricidad en la zona sur de este país, específicamente en la Región de Magallanes (Ministerio de Energía, 2020), por lo que se debe aprovechar esta fuente de energía (Ver figura 3.6 y 3.7).

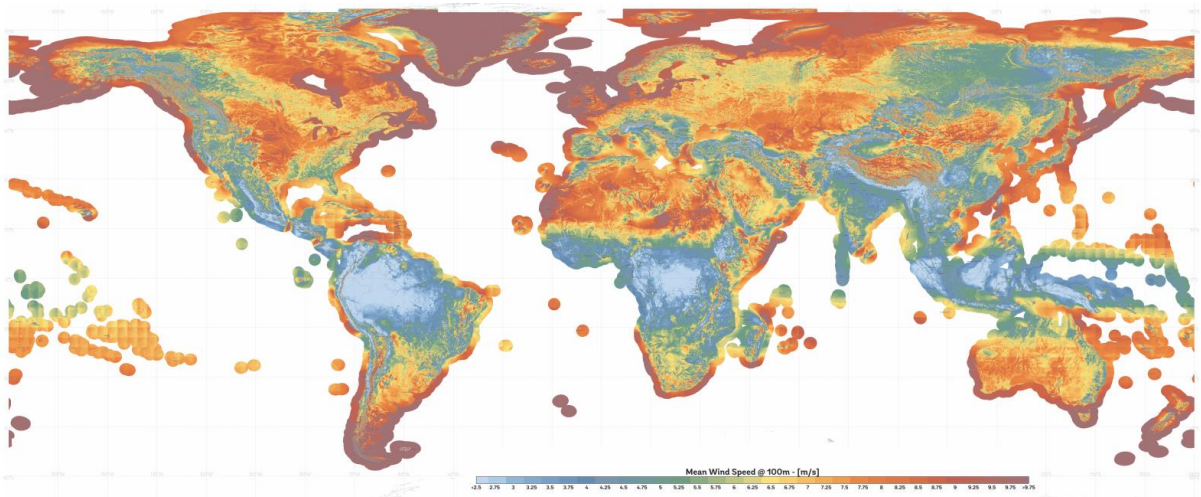


Figura 3.6: Cartografía mundial de la velocidad del viento.
Fuente Imagen: (Global Wind Atlas , 2019).

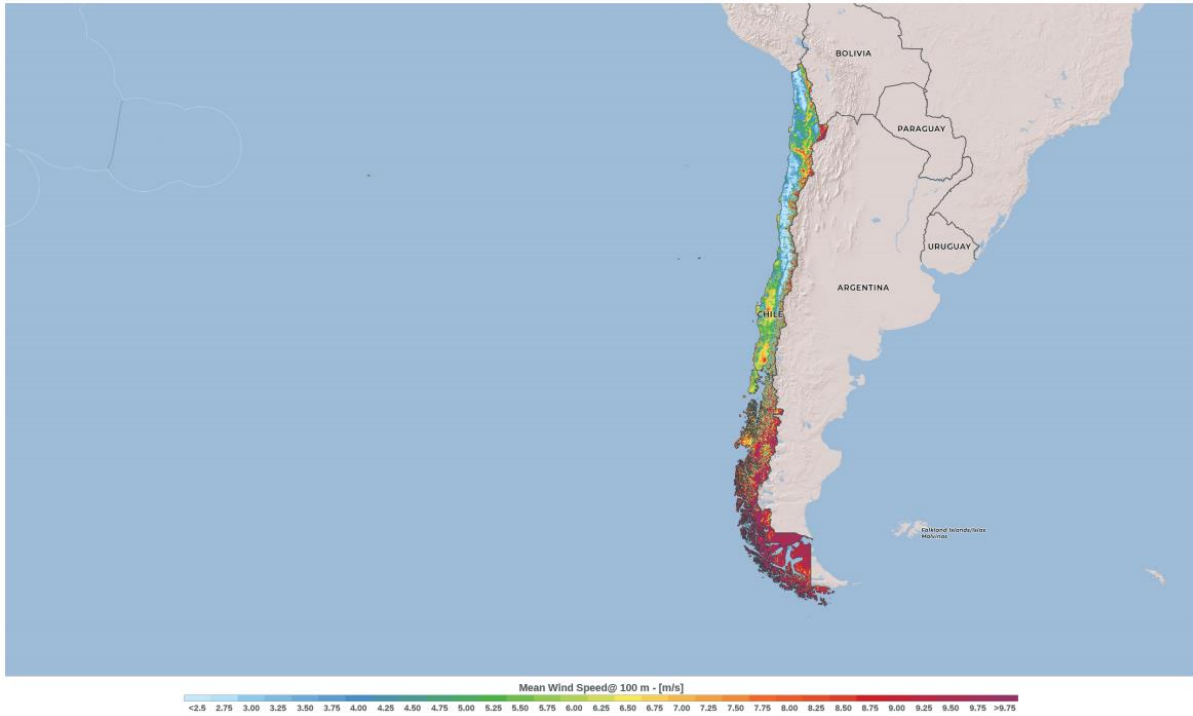


Figura 3.7: Cartografía de la velocidad del viento en Chile.

Fuente Imagen: (Global Wind Atlas , 2019).

– *Costos*

Tal como se mencionó anteriormente, solo se considerarán las fuentes de energía solar y eólica dentro del presente estudio, por lo que sus costos entre los años 2020 y 2050 se pueden ver en la figura 3.8.

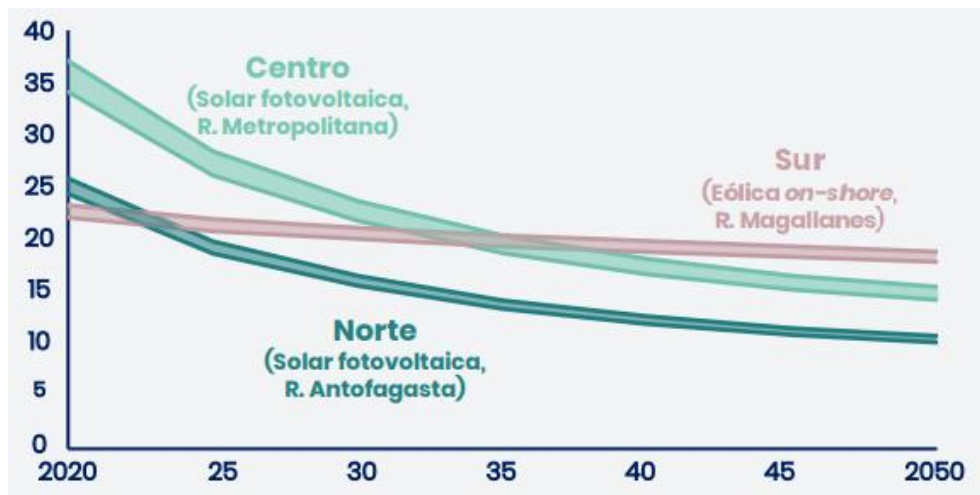


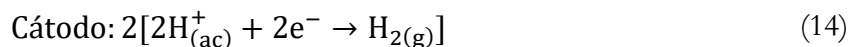
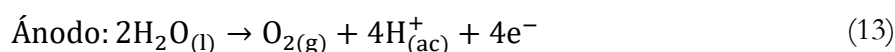
Figura 3.8: Costo nivelado de electricidad renovable (USD/MWh).

Fuente Imagen: (Ministerio de Energía, 2020).

En donde, se puede apreciar que la energía solar tendrá una considerada baja de costos a través de los años, llegando a estar entre 10 a 15 USD/MWh. Mientras que la energía eólica se mantiene levemente constante entre los mismos intervalos de tiempo a aproximadamente 20 USD/MWh.

3.4.2.2 Hidrógeno a partir de la electrólisis

La electrólisis del agua es un proceso que utiliza la electricidad para lograr la descomposición del agua, con el objetivo de obtener oxígeno e hidrógeno, con un alto grado de purzas. La corriente eléctrica aplicada debe ser continua y esta pasa por dos electrodos de grafito, ánodo y cátodo, los cuales están insertados en una solución acuosa generando una transferencia de electrones causando una reacción de oxidación en el ánodo y una reacción de reducción en el cátodo, mostradas a continuación en las ecuaciones 13 y 14:



Las moléculas de hidróxido (OH) migran al ánodo en donde se oxidarán desprendiendo O₂. Mientras que los protones (H⁺) se dirigen al cátodo en donde se reducirán a H₂. Resultando, hidrógeno y oxígeno por la ruptura de la molécula de agua mediante electricidad, tal como se muestra en la reacción química de la ecuación 15 (Figura 3.9):

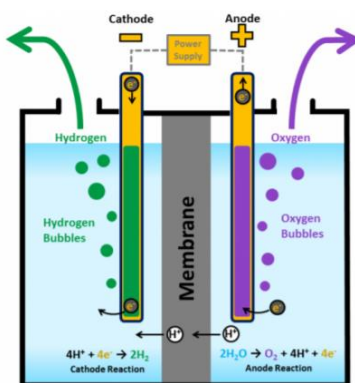


Figura 3.9: Principio de funcionamiento de la electrólisis.

Fuente Imagen: (Murray, 2018).

Aunque es uno de los procesos más costosos para la obtención de hidrógeno, también tiende a ser el más sustentable para el medio ambiente, ya que al utilizar una fuente de energía como la energía solar para hacer efectivo este procedimiento, se estaría produciendo hidrógeno 100% a través de recursos renovables, siendo este el llamado hidrógeno verde (Murray, 2018).

– *Emisiones liberadas*

La obtención de hidrógeno por medio de la electrólisis del agua utilizando las fuentes de energía solar y eólicas permiten obtener resultados de 0,04 toneladas de dióxido de carbono liberadas hacia la atmósfera por cada tonelada de hidrógeno producida (Figura 3.13), a diferencia de obtener hidrógeno por medio del reformado de hidrocarburos, que libera 9,5 toneladas de dióxido de carbono por cada tonelada de hidrógeno producidas (Figura 3.12) (Gaete, 2020).

– *Costos*

Según el Ministerio de Energía de Chile, los costos de producción de hidrógeno entre los años 2025 y 2050, tienden a disminuir considerablemente. En donde la obtención de hidrógeno por medio de la electrólisis utilizando la energía solar, oscilan entre 2,0 y 2,6 USD/kg H₂ en el año 2025, y entre 0,8 y 1,1 USD/kg H₂ en el año 2050. Mientras que la energía eólica comienza en el año 2025 a un costo de 1,7 USD/kg H₂, y disminuye a 1,0 USD/Kg H₂ (Ver figura 3.10).

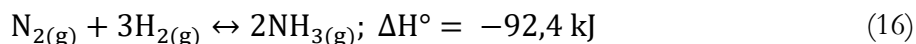


Figura 3.10: Costo nivelado de hidrógeno verde (USD/kg H₂).

Fuente Imagen: (Ministerio de Energía, 2020).

3.5 Procesos de Fabricación - Obtención del amoníaco

El proceso de Haber – Bosch, desarrollado y diseñado por Carl Bosch, es uno de los más utilizados para la producción de amoníaco a partir de los reactivos hidrógeno y nitrógeno, este último presente en abundancia en el aire con aproximadamente un 80%. La cual es representada en la ecuación 16, a continuación:



En donde el proceso se considera una reacción exotérmica que se encuentra con presiones sobre las 300 Atm, temperaturas entre 400 y 500°C, y utiliza catalizadores férricos u óxidos de aluminio, los que juntos provocarán la viabilidad del procedimiento.

Como este proceso se basa en la reacción entre el hidrógeno y nitrógeno, este último se obtiene mediante la destilación fraccionada del aire licuado. Mientras que el hidrógeno a través de distintos procesos mencionados anteriormente. Luego, los gases calientes generados pasan a ser enfriados para poder licuarlo y finalmente lograr la obtención del amoníaco (Figura 3.11). Cabe destacar que no todo el hidrógeno y nitrógeno son capaces de reaccionar, por lo que estos se reciclan para poder volver a ser reutilizados en la obtención del amoníaco.

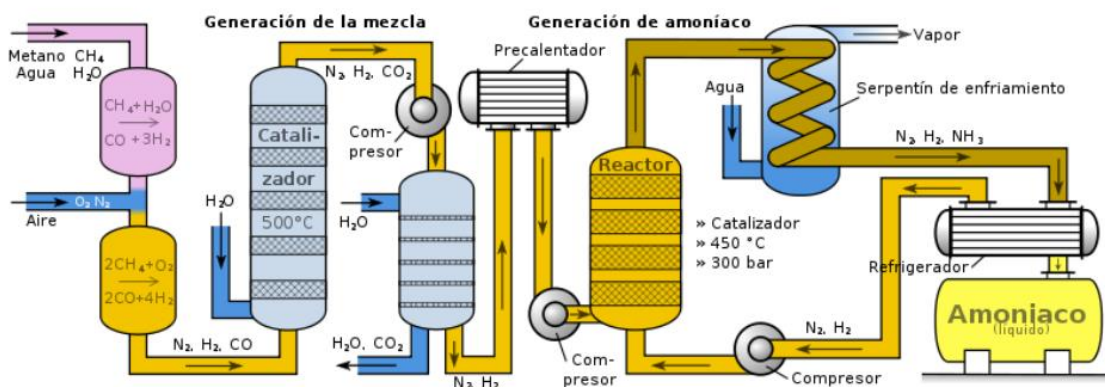


Figura 3.11: Proceso de Haber – Bosch para la fabricación de amoníaco.

Fuente Imagen: (Ribeiro, 2013).

3.5.1 Emisiones liberadas en la obtención de amoníaco gris

En el proceso de Haber – Bosch para producir amoníaco, se liberan gases contaminantes los cuales su cantidad liberada depende directamente del tipo de combustible utilizado. El más común

es el CO₂, que tal como se muestra en la tabla 3.5, el uso de carbón como combustible es el que más emisiones de CO₂ libera mediante la oxidación parcial, a diferencia del uso de gas natural por medio de reformado de vapor, que es el que menos emisiones de CO₂ libera.

Tabla 3.5: Emisiones de CO₂ en la producción de amoníaco para distintos tipos de combustibles y tecnologías utilizadas. Fuente Tabla: (Rafiqul, Weber, Lehmann, & Voss, 2005).

Fuel used	Technology	Year	Country/ region	SEC (GJ/t NH ₃)	Emission factor (gCO ₂ /MJ)	CO ₂ (t/t NH ₃)
Natural gas	Steam reforming	1994–1996	US	41.3	55.7	2.3
		1994–1996	EU	34.9	55.7	1.9
		1994–1995	India	38.7	55.7	2.2
Heavy fuel oil	Partial oxidation	1994–1995	India	59.8	78.6	4.7
Coal	Partial oxidation	1991–1992	India	165.9	100.7	16.7

Aun así, al utilizar reformado de metano con vapor para la producción de hidrógeno y posteriormente junto al nitrógeno del aire obtener amoníaco gris, se estarán produciendo 1,69 toneladas de CO_{2e} por cada tonelada de NH₃ (Gaete, 2020).

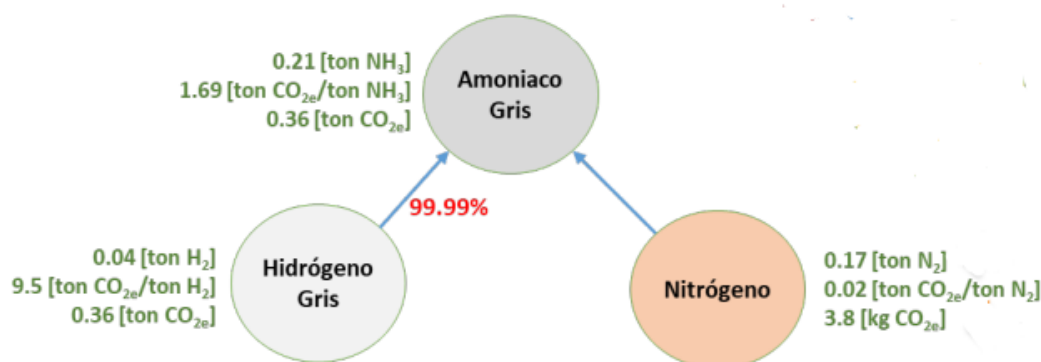


Figura 3.12: Emisiones liberadas en la producción de Amoníaco Gris.

Fuente Imagen: (Gaete, 2020).

Además, otro de los gases contaminantes que se ven liberados hacia la atmósfera durante el proceso de producción del amoníaco son los óxidos de nitrógeno (NO_x), al liberar menos de 300 ppm de NO_x cuando se liberan entre 8 a 12 % de dióxido de carbono (CO₂) (Ver Tabla 3.6) (Kirova-Yordanova, 2010).

3.5.2 Emisiones liberadas en la obtención de amoníaco verde

En el caso de obtener hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua y utilizando fuente de energía renovable, como la solar o eólica, para luego mezclarlo con nitrógeno del aire y como resultado producir amoníaco verde, tendrá una disminución en las emisiones liberadas de CO₂ de un 88%. Pasando de una producción de 1,69 toneladas de CO₂ por cada tonelada de NH₃ en el caso de utilizar hidrógeno gris, a liberar solo 0,04 toneladas de CO₂ por cada tonelada de NH₃ al utilizar hidrógeno verde en su producción.

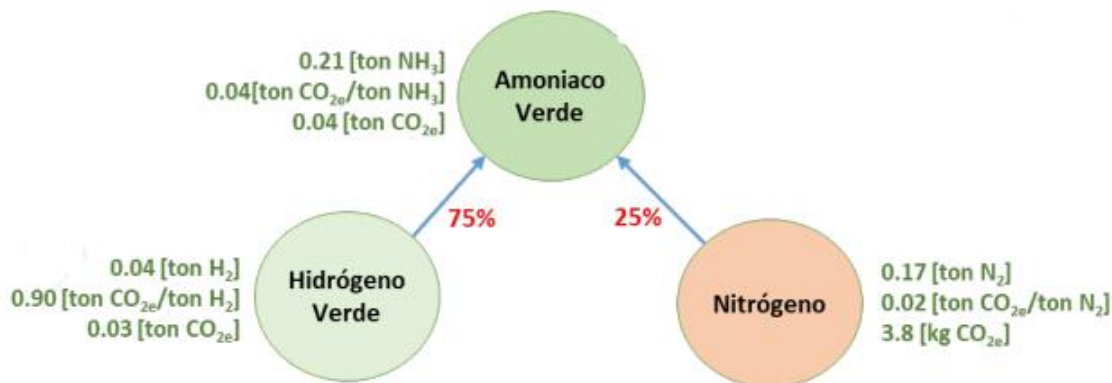


Figura 3.13: Emisiones liberadas en la producción de Amoníaco Verde.

Fuente Imagen: (Gaete, 2020).

3.6 Procesos de Fabricación - Obtención del nitrato de amonio

El nitrato de amonio (NH₄NO₃), como se ha mencionado anteriormente, es la materia prima en la fabricación del ANFO, con un aproximado del 94% de concentración. El cual puede ser obtenido mediante dos etapas. Primero, a altas temperaturas el amoníaco que fue obtenido en procesos anteriores (planta de amoníaco) como amoníaco líquido, es pasado por una fuerte oxidación exotérmica para obtener óxido nítrico (NO) en la planta de ácido nítrico, y por medio de agua, los óxidos son absorbidos para obtener ácido nítrico (HNO₃) al 60% de concentración, a través del proceso de Ostwald. Luego, la segunda etapa es la neutralización por el amoníaco obtenido por la etapa anterior. En donde el amoníaco es nuevamente mezclado con la solución de ácido nítrico para producir nitrato de amonio con concentraciones entre 82 – 85%, y así sucesivamente hasta lograr la obtención del nitrato de amonio al 95% de concentración. Después de obtener esta solución concentrada de nitrato de amonio, se pasa por un proceso de granulación en una torre *prilling* y posteriormente a secado. Finalmente, los gránulos se tamizan y son dejados

en reposo para que puedan disminuir su temperatura y lograr ser almacenados (Ver figura 3.14) (Galdames, 2021).

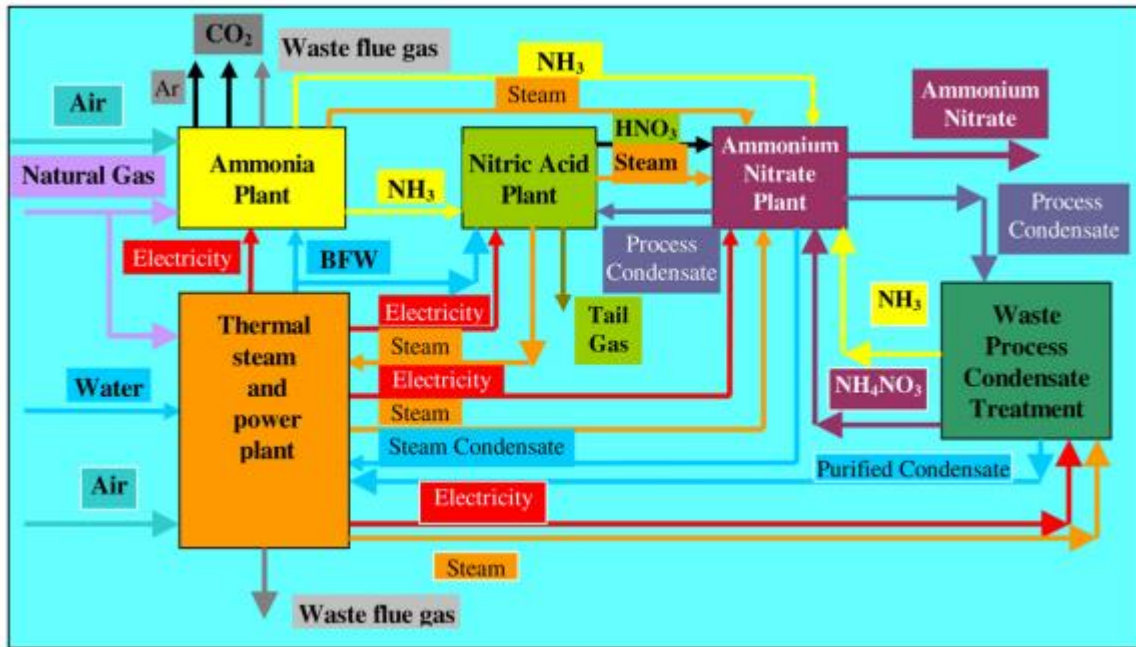
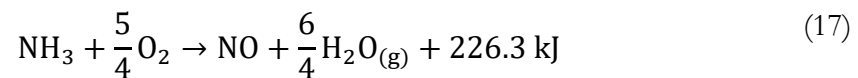


Figura 3.14: Diagrama de flujo del proceso de producción del nitrato de amonio.

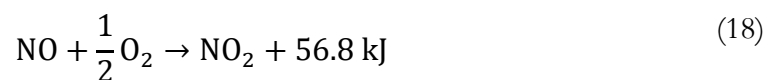
Fuente Imagen: (Kirova-Yordanova, 2010).

Con respecto a las reacciones químicas que ocurren en la primera etapa, para obtener el ácido nítrico a partir del amoníaco, estas son:

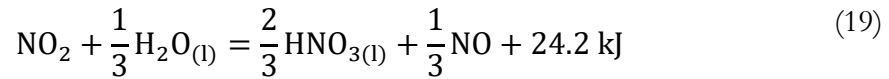
- En la ecuación 17, se puede ver la reacción química de la oxidación catalítica del amoníaco en el aire a óxido nítrico:



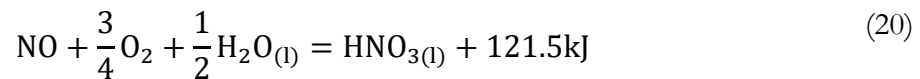
- En la ecuación 18, se puede ver la reacción química de la oxidación homogénea de óxido nítrico a dióxido de nitrógeno (NO_2):



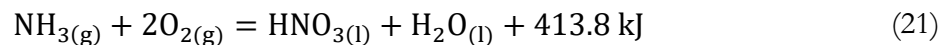
- En la ecuación 19, se puede ver la reacción química de la absorción de dióxido de nitrógeno en agua:



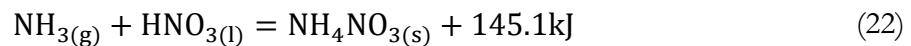
Pero, debido a una nueva formación de óxido nítrico la reacción química anterior se debe nuevamente oxidar, obteniendo la ecuación 20 que se ve a continuación:



Finalmente, en la ecuación 21 se puede ver la reacción química en donde se obtiene el ácido nítrico:



En la etapa dos para la obtención del nitrato amónico, existe solo una reacción química, que se muestra en la ecuación 22, en donde se pretende evaporar la mayor cantidad de agua posible mediante el calor de la reacción, incluso utilizando vapor adicional ya que no es suficiente solo con el calor de la reacción y con el fin de poder obtener gránulos sólidos de nitrato de amonio (Kirova-Yordanova, 2017):



Tal como se puede apreciar en cada una de las reacciones la abundancia de nitrógeno presente, es de hecho una de las razones por la cual es utilizado como fertilizante pero también como explosivo a temperaturas entre 260°C a 300°C, en los procesos de detonación dentro del rubro minero (ECOSTANDAR, s.f).

3.6.1 Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno gris

En la producción del nitrato de amonio ocurre constantemente una liberación de gases contaminantes en cualquiera de sus plantas. En el caso de la planta de ácido nítrico, las emisiones

que van hacia la atmosfera son comúnmente provenientes del desperdicio, los cuales tienden a ser óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxido nitroso (N₂O), ambos contribuyentes al efecto invernadero, la producción de lluvia ácida y la destrucción del ozono atmosférico (Kirova-Yordanova, 2010).

Por otro lado, en la planta de nitrato de amonio específicamente en el proceso de evaporación, también se encuentra una liberación del polvo, gotas de amoniaco, nitrato de amonio, y CO₂ hacia la atmósfera.

Tabla 3.6: Emisiones producidas en la producción de nitrato de amonio y sus intermedios: amoniaco y ácido nítrico. Fuente Tabla: (Kirova-Yordanova, 2010).

<i>Emissions and liquid effluents from AN plant</i>	
Basic reaction	$\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \text{ (45–62\%)} \Rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$
Emissions into atmosphere	Process steam: NH ₃ , AN dust and droplets Air from prilling towers: NH ₃ , AN dust
Liquid effluents	Process condensate (water from nitric acid solution): NH ₃ , NH ₄ NO ₃
<i>Emissions and liquid effluents from NH₃ plant</i>	
Basic reaction	Natural gas + Water (Steam) + Air \Rightarrow 3 $\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{Ammonia} + \text{CO}_2$
Emissions into atmosphere	Vent gas from CO ₂ removal unit: 98.5–99% CO ₂ Flue gas from reforming furnace: 8–12% CO ₂ ; <300 ppm NO _x
Liquid effluents	Process condensate (from surplus steam): 0.1% NH ₃ , 0.1% CH ₃ OH
<i>Emissions from nitric acid plant</i>	
Basic reactions	$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \text{ (Air)} \Rightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$ $2\text{NO} + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{NO}_2$ $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$
Undesirable parallel reactions	$4\text{NH}_3 + 4\text{O}_2 \text{ (Air)} \Rightarrow 2\text{N}_2\text{O} + 6\text{H}_2\text{O}$ $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \text{ (Air)} \Rightarrow 2 \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
Emissions into atmosphere	Tail (waste) gas: NO _x , N ₂ O

De hecho, al producir hidrógeno gris para obtener nitrato de amonio se estarían liberando hacia la atmosfera 1,76 toneladas de CO₂ por cada tonelada de nitrato de amonio fabricadas, y un kilo de N₂O por cada 298 kg de CO₂ (Ver figura 3.15) (Gaete, 2020).

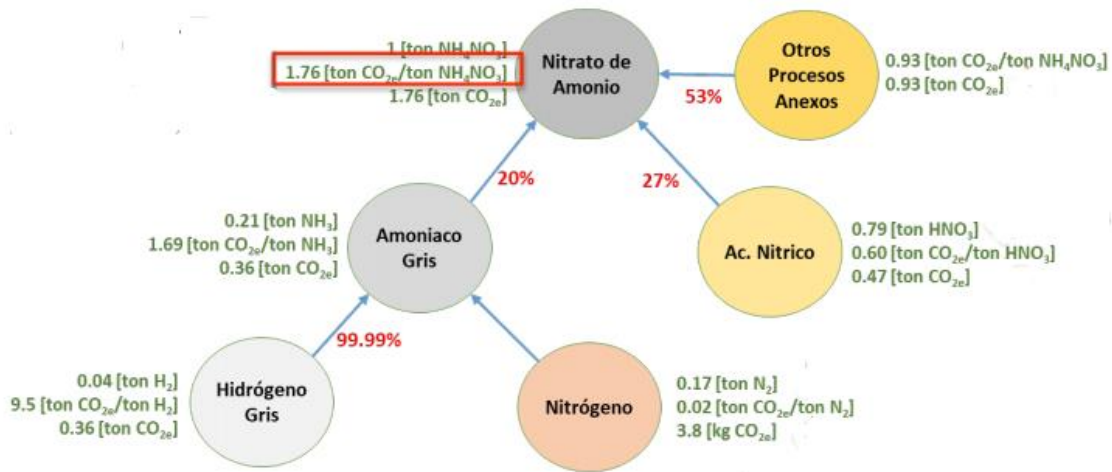


Figura 3.15: Emisiones liberadas en la producción de nitrato de amonio utilizando hidrógeno gris.

Fuente Imagen: (Gaete, 2020).

3.6.2 Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno verde

En el caso de utilizar hidrógeno verde para la fabricación de nitrato de amonio, solo un 20% de las emisiones producidas de CO₂ ha disminuido. Pasando de 1,76 a 1,41 toneladas de CO₂ por cada tonelada de nitrato de amonio fabricadas. Mientras que no existiría emisiones de N₂O (ver figura 3.16) (Gaete, 2020).

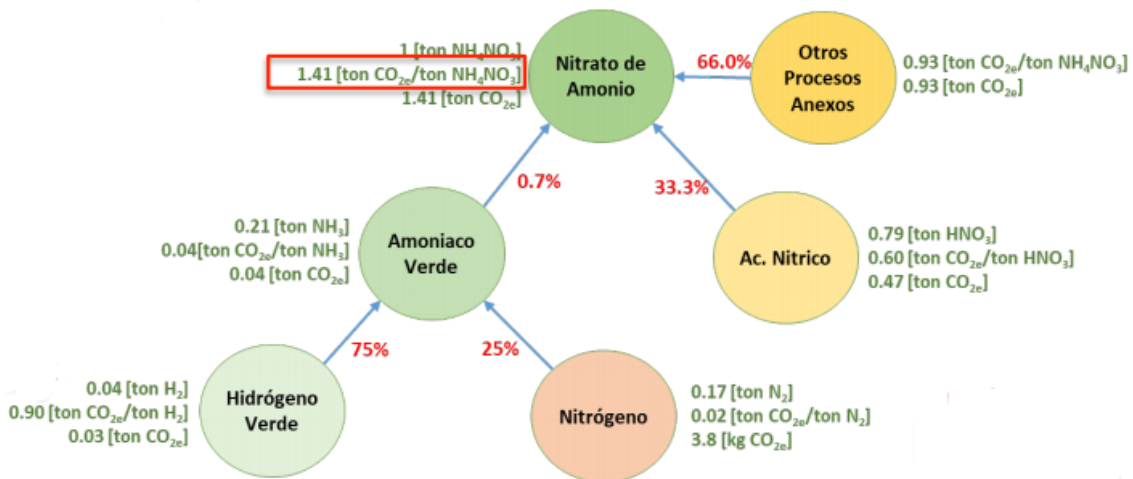


Figura 3.16: Emisiones liberadas en la producción de nitrato de amonio utilizando hidrógeno verde.

Fuente Imagen: (Gaete, 2020).

3.7 Procesos de Fabricación - Obtención del ANFO

Para la fabricación del ANFO se necesita nitrato amónico y aluminio, emisiones o poliestireno dependiendo del tipo de ANFO que se desea, los cuales serán vertidos en una tolva de alimentación y luego a un mezclador helicoidal, en donde se estará inyectando combustible fósil, específicamente Diesel, hasta que la mezcla este complemente lista. Finalmente, dependiendo de lo que se quiera obtener, el ANFO pasará a la máquina ensacadora si se trata de granel, o a una máquina encartuchadora si se trata de ANFO encartuchado (Abellán, 2013)(Figura 3.17).

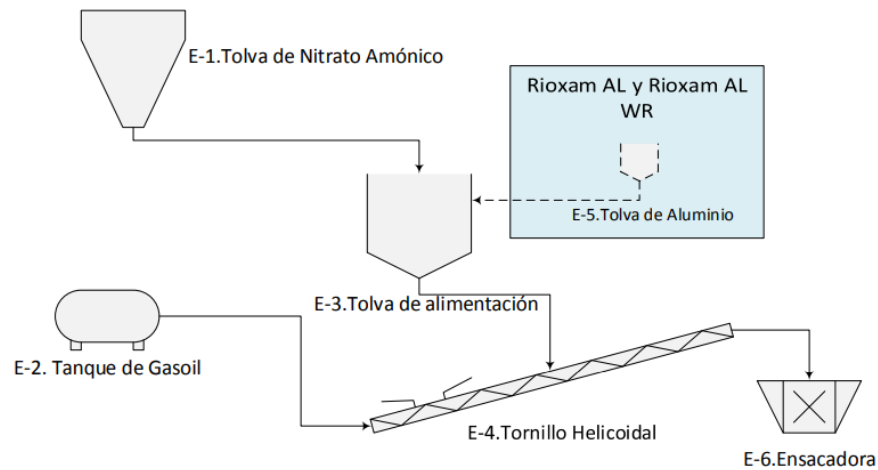


Figura 3.17: Esquema de fabricación de ANFO.

Fuente Imagen: (Abellán, 2013).

Esta mezcla que se realiza para obtener el ANFO la gran mayoría de las veces se efectúa en las plantas de servicios ubicadas en las faenas mineras, contemplando los silos para almacenamiento de nitrato de amonio y sistemas de iniciación, como lo realiza ENAEX con sus clientes. Esto se debe a que el transporte del ANFO al ser un explosivo tiende a ser mucho más peligroso que transportar el nitrato de amonio, el cual es un agente de voladura que no detonará en caso de alguna estimulación con fuego o golpes (Galdames, 2021).

4 Caso de estudio

4.1 Producción de nitrato de amonio

Con el objetivo de obtener las emisiones contaminantes liberadas en cada uno de los procesos de fabricación del nitrato de amonio y sus costos de producción, a partir del hidrógeno gris y verde durante los siguientes 10 años. Se han considerado dentro de este caso de estudio la cantidad producida anualmente de nitrato de amonio fabricados por ENAEX, asumiendo que dicha empresa solo distribuye este compuesto a las empresas mineras de Chile. Estos se aprecian en la tabla 4.1, a continuación:

Tabla 4.1: Producción anual de Enaex entre los años 2013 – 2020. Fuente Tabla: (Enaex S.A., 2020).

Año	Producción Anual (Ton)
2013	773.000
2014	782.000
2015	782.000
2016	700.000
2017	683.000
2018	702.000
2019	732.000
2020	716.000

Lo primero que se realizó, fue la proyección absoluta, porcentual, algorítmica y lineal para conocer la producción de nitrato de amonio dentro de los próximos 10 años. Luego, para conocer la cantidad de amoniaco, ácido nítrico, hidrógeno y nitrógeno necesarios para producir nitrato de amonio durante los próximos 10 años, se utilizó un promedio entre las cuatro proyecciones para entregar un valor lo más cercano a la realidad. Cuyo resultado se puede ver en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Proyecciones de la producción de nitrato de amonio en Chile durante 2021-2030. Fuente Tabla:
(Elaboración propia).

Producción de nitrato de amonio (Ton)					
Año	P. Absoluta	P. Porcentual	P. Logarítmica	P. Lineal	Promedio
2021	704.125	705.648	697.152	678.833	696.440
2022	692.250	695.446	692.260	666.133	686.522
2023	680.375	685.392	687.793	653.433	676.748
2024	668.500	675.482	683.684	640.733	667.100
2025	656.625	665.716	679.880	628.033	657.564
2026	644.750	656.092	676.339	615.333	648.128
2027	632.875	646.606	673.026	602.633	638.785
2028	621.000	637.257	669.914	589.933	629.526
2029	609.125	628.044	666.980	577.233	620.345
2030	597.250	618.964	664.204	564.533	611.238

Considerando que el 94% del ANFO corresponde a nitrato de amonio promedio visto en la tabla 4.2, la cantidad anual de ANFO producido entre el año 2021 y 2030, se puede ver en la tabla 4.3.

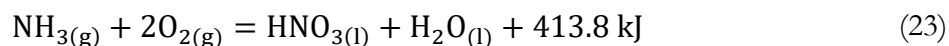
Tabla 4.3: Cantidad de ANFO producido en Chile durante el 2021 y 2030.

Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	ANFO (Ton)
2021	740.894
2022	730.343
2023	719.945
2024	709.681
2025	699.536
2026	689.498
2027	679.559
2028	669.709
2029	659.941
2030	650.253

Por otro lado, para conocer la cantidad de amoníaco y ácido nítrico de la producción anual promediada entre el 2021 y 2030, se debe considerar que el amoníaco es utilizado en las dos etapas necesarias para la producción de nitrato de amonio, una es en la obtención del ácido nítrico (ecuación 23) y la otra en la misma obtención del nitrato de amonio (ecuación 24).

En base a la ecuación 15:



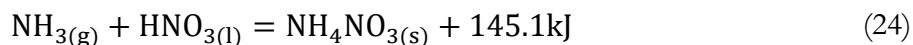
Obteniendo un gramaje total por cada elemento o compuesto de la ecuación 23, que se puede apreciar en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Gramaje total del amoníaco, oxígeno, ácido nítrico y agua. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Elemento/Compuesto	Peso Molecular (gr)	Cantidad de átomos	Resultado (gr)
Amoníaco (NH ₃)	N = 14 H = 1	N = 1 H = 3	17
2 de Oxígeno (O ₂)	O = 16	4	64
Ácido Nítrico (HNO ₃)	N = 14 H = 1 O = 16	N = 1 H = 1 O = 3	63
Agua (H ₂ O)	H = 1 O = 16	H = 2 O = 1	18

Esto quiere decir, que se necesitan 17 gr de amoníaco para producir 63 gr de ácido nítrico.

Por otro lado, para la producción de nitrato de amonio y en base a la ecuación 24 vista a continuación:



Se obtiene un gramaje total por cada elemento o compuesto de la ecuación 24, que se puede apreciar en la tabla 4.5, a continuación:

Tabla 4.5: Gramaje total del amoniac, ácido nítrico, y nitrato de amonio. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Elemento/Compuesto	Peso Molecular	Cantidad de átomos	Resultado (gr)
Amoniac (NH ₃)	N = 14 H = 1	N = 1 H = 3	17
Ácido Nítrico (HNO ₃)	N = 14 H = 1 O = 16	N = 1 H = 1 O = 3	63
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)	N = 14 H = 1 O = 16	N = 2 H = 4 O = 3	80 gr

Resultando ser que se necesitan 17 gr de amoniac para la producción de 80 gr de nitrato de amonio.

Por ende, para producir tan solo 80 gr de nitrato de amonio, en total se deben utilizar 34 gr de amoniac (17 gramos para el ácido nítrico y 17 gr para el nitrato de amonio). Entonces, para conocer cuántas son las toneladas de amoniac necesarias para cubrir la producción anual de nitrato de amonio entre el 2021 y 2030, se realiza la siguiente regla de tres simple para cada año (mostrándose solo un ejemplo paso a paso del primer año).

Se tiene que:

$$80 \text{ gr NH}_4\text{NO}_3 \text{ ----- } 34 \text{ gr NH}_3$$

Esto, en toneladas es:

$$8 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_4\text{NO}_3 \text{ ----- } 3,4 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_3$$

Por lo que, para el primer año al requerir 696.440 toneladas de NH₄NO₃ se necesitan:

$$\begin{array}{l} 8 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_4\text{NO}_3 \text{ ----- } 3,4 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_3 \\ 696.440 \text{ Ton NH}_4\text{NO}_3 \text{ ----- } X \text{ Ton NH}_3 \\ X \text{ ----- } 295.987 \text{ Ton NH}_3 \end{array}$$

Mientras que la cantidad de ácido nítrico necesario se calcula mediante la ecuación 25:

$$x \text{ Ton HNO}_3 = \text{Ton NH}_4\text{NO}_3 - \text{Ton NH}_3 \quad (25)$$

$$x \text{ Ton HNO}_3 = 696.440 \text{ Ton NH}_4\text{NO}_3 - 295.987 \text{ Ton NH}_3$$

$$x = 400.453 \text{ Ton HNO}_3$$

Resultando para cada año, la siguiente cantidad de amoníaco y ácido nítrico vistos en la tabla 4.6:

Tabla 4.6: Tonelaje total de amoníaco y ácido nítrico necesarios para producir nitrato de amonio. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Nitrato de Amonio (Ton)	Amoníaco (Ton)	Ácido Nítrico (Ton)
2021	696.440	295.987	400.453
2022	686.522	291.772	394.750
2023	676.748	287.618	389.130
2024	667.100	283.517	383.582
2025	657.564	279.465	378.099
2026	648.128	275.455	372.674
2027	638.785	271.484	367.301
2028	629.526	267.549	361.977
2029	620.345	263.647	356.699
2030	611.238	259.776	351.462

4.1.1 Emisiones liberadas al utilizar amoníaco gris

En la figura 3.15 del capítulo 3, se muestra cómo por cada tonelada de nitrato de amonio producido se liberan 1,76 toneladas de dióxido de carbono. Esto quiere decir que, en el año 2021 al producir 696.440 toneladas de nitrato de amonio, se necesitarán 295.987 toneladas de amoníaco y 400.453 toneladas de ácido nítrico. Resultando liberar hacia la atmosfera 1.450.240 toneladas de dióxido de carbono. Tal como lo indica el siguiente cálculo de la ecuación 26:

$$\frac{1,76 \text{ Ton de CO}_2}{1 \text{ Ton de NH}_4\text{NO}_3} = \frac{x}{696.440 \text{ Ton de NH}_4\text{NO}_3} \quad (26)$$

$$x = 1.225.734 \text{ Ton de CO}_2$$

Además, por cada 298 kg de dióxido de carbono se libera 1 kg de N₂O. Por lo que para conocer la cantidad de N₂O liberados hacia la atmosfera cuando se producen 1.225.734 toneladas de dióxido de carbono, se hará el siguiente cálculo a través de la ecuación 27:

$$\frac{1 \text{ kg N}_2\text{O}}{298 \text{ kg CO}_2} = \frac{x}{1,225 \times 10^9 \text{ kg CO}_2} \quad (27)$$

$$x = 4,113 \times 10^6 \text{ kg N}_2\text{O}$$

Aproximadamente, 4.113 toneladas de N₂O liberadas hacia la atmósfera por las 1.225.734 toneladas de CO₂.

Resultando entre los años 2021 y 2030, la siguiente cantidad de emisiones liberadas hacia la atmósfera (Ver tabla 4.7):

4.1.2 Emisiones liberadas al utilizar amoniaco verde

En el capítulo 3, específicamente en la figura 3.16, se muestra cómo por cada tonelada de nitrato de amonio producido se liberan 1,41 de dióxido de carbono al utilizar amoniaco verde. Esto quiere decir que en el año 2021 al producir 696.440 toneladas de nitrato de amonio se liberarán a la atmósfera 981.980 toneladas de dióxido de carbono. Tal como se indica en el cálculo de la ecuación 28:

$$\frac{1,41 \text{ Ton de CO}_2}{1 \text{ Ton de NH}_4\text{NO}_3} = \frac{x}{696.440 \text{ Ton de NH}_4\text{NO}_3} \quad (28)$$

$$x = 981.980 \text{ Ton de CO}_2$$

Y, los siguientes resultados presentados en la tabla 4.7, dan referencia a la tabla 4.8.

Tabla 4.7: Emisiones liberadas en el proceso de producción del nitrato de amonio tras utilizar amoniaco gris, entre 2021 y 2030. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de Nitrato de Amonio (Ton)	Emisiones de CO₂ (Ton)	Emisiones de N₂O (Ton)
2021	696.440	1.225.734	4.113
2022	686.522	1.208.279	4.055
2023	676.748	1.191.077	3.997
2024	667.100	1.174.096	3.940
2025	657.564	1.157.312	3.884
2026	648.128	1.140.706	3.828
2027	638.785	1.124.261	3.773
2028	629.526	1.107.966	3.718
2029	620.345	1.091.808	3.664
2030	611.238	1.075.778	3.610

Tabla 4.8: Emisiones liberadas en el proceso de producción del nitrato de amonio tras utilizar amoniaco verde, entre 2021 y 2030. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción Nitrato de Amonio (Ton)	Emisiones de CO₂ (Ton)
2021	696.440	981.980
2022	686.522	967.996
2023	676.748	954.215
2024	667.100	940.611
2025	657.564	927.165
2026	648.128	913.861
2027	638.785	900.687
2028	629.526	887.632
2029	620.345	874.687
2030	611.238	861.845

4.1.3 Emisiones liberadas al producir ácido nítrico

En la figura 3.15, se ilustra cómo para producir una tonelada de ácido nítrico se liberarán hacia la atmósfera 0,60 toneladas de CO₂. Eso quiere decir que, en base a la cantidad de ácido nítrico necesarios para producir nitrato de amonio entre el 2021 y 2030, se necesitarán a modo de ejemplo en el primer año, el resultado obtenido resolviendo la ecuación 29:

$$\frac{0,60 \text{ Ton de CO}_2}{1 \text{ Ton de HNO}_3} = \frac{x}{400.453 \text{ Ton de HNO}_3} \quad (29)$$
$$x = 240.272 \text{ Ton de CO}_2$$

Y los resultados de emisiones liberadas de CO₂ entre los años 2021 y 2030, se pueden apreciar en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Emisiones liberadas de CO₂ en la producción de ácido nítrico. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de ácido nítrico (Ton)	Emisiones de CO ₂ (Ton)
2021	400.453	240.272
2022	394.750	236.850
2023	389.130	233.478
2024	383.582	230.149
2025	378.099	226.859
2026	372.674	223.604
2027	367.301	220.381
2028	361.977	217.186
2029	356.699	214.019
2030	351.462	210.877

4.2 Producción de Amoniac

En el capítulo 3, se ha mencionado que para producir amoniac se requiere mezclar hidrógeno y nitrógeno en un proceso llamado Haber-Bosch. Por lo que debemos conocer la cantidad que se necesitan de ambos para producir las cantidades de amoniac entre los años 2021-2030 vistos en la tabla 4.9.

Para esto, presentamos la ecuación equilibrada del amoníaco vista en el capítulo 3, en la ecuación 30.



Tabla 4.10: Gramaje total del nitrógeno, hidrógeno, y amoníaco. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Elemento/Compuesto	Peso Molecular (gr)	Cantidad de átomos	Resultado (gr)
Nitrógeno (N)	14	2	28
Hidrógeno (H)	1	6	6
Amoníaco (NH ₃)	N = 14 H = 1	N = 2 H = 6	34

Esto quiere decir, que para producir tan solo 34 gr de amoníaco se necesitarán 28 gr de nitrógeno y 6 gr de hidrógeno. Por ende, para calcular la cantidad de hidrógeno y nitrógeno necesarios se hará una regla simple de tres para el primer año paso a paso a modo de ejemplo.

Se tiene que:

$$34 \text{ gr NH}_3 \quad \text{-----} \quad 6 \text{ gr H}_2$$

Esto, en toneladas es:

$$3,4 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_3 \quad \text{-----} \quad 6 \times 10^{-6} \text{ Ton H}_2$$

Por lo que, para el primer año al requerir 295.987 toneladas de NH₃ se necesitan:

$$\begin{array}{l} 3,4 \times 10^{-5} \text{ Ton NH}_3 \quad \text{-----} \quad 6 \times 10^{-6} \text{ Ton H}_2 \\ 295.987 \text{ Ton NH}_3 \quad \text{-----} \quad X \text{ Ton H}_2 \\ X \quad \text{-----} \quad 52.233 \text{ Ton H}_2 \end{array}$$

Mientras que la cantidad de nitrógeno necesaria es:

$$\begin{aligned}
 x \text{ Ton N}_2 &= \text{Ton NH}_3 - \text{Ton H}_2 \\
 x \text{ Ton N}_2 &= 295.987 \text{ Ton NH}_3 - 52.233 \text{ Ton H}_2 \\
 x \text{ Ton N}_2 &= 243.754 \text{ Ton N}_2
 \end{aligned}$$

Resultando para cada año la siguiente cantidad de hidrógeno y nitrógeno para producir amoniaco (Tabla 4.11).

Tabla 4.11: Cantidades de hidrógeno y nitrógeno necesarios para producir amoniaco entre el 2021 y 2030. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Amoniaco (Ton)	Hidrógeno (Ton)	Nitrógeno (Ton)
2021	295.987	52.233	243.754
2022	291.772	51.489	240.283
2023	287.618	50.756	236.862
2024	283.517	50.032	233.485
2025	279.465	49.317	230.147
2026	275.455	48.610	226.845
2027	271.484	47.909	223.575
2028	267.549	47.214	220.334
2029	263.647	46.526	217.121
2030	259.776	45.843	213.933

4.2.1 Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno gris

Tal como se mostró en el subcapítulo 3.5.1, se producen 1,69 toneladas de CO₂ por cada tonelada de NH₃. Esto quiere decir, que en el año 2021 para producir 295.987 toneladas de amoniaco se estarían liberado el resultado obtenido tras resolver la ecuación 31, a continuación:

$$\begin{aligned}
 \frac{1,69 \text{ ton CO}_2}{1 \text{ ton NH}_3} &= \frac{x}{295.987 \text{ ton NH}_3} & (31) \\
 x &= 500.218 \text{ ton CO}_2
 \end{aligned}$$

Y, durante los próximos 9 años las cantidades de CO₂ liberadas son (Ver tabla 4.12):

Tabla 4.12: Emisiones de CO₂ liberadas hacia la atmosfera tras producir amoniaco a partir del hidrógeno gris.

Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de Amoniaco Gris (Ton)	Emisiones de CO ₂ (Ton)
2021	295.987	500.218
2022	291.772	493.095
2023	287.618	486.074
2024	283.517	479.145
2025	279.465	472.295
2026	275.455	465.518
2027	271.484	458.807
2028	267.549	452.157
2029	263.647	445.563
2030	259.776	439.022

4.2.2 Emisiones liberadas al utilizar hidrógeno verde

En el subcapítulo 3.5.2, se ha mostrado que por cada tonelada de NH₃ se producen 0,04 toneladas de CO₂. Esto quiere decir que, en el año 2021 al producir 295.985 toneladas de amoniaco, las emisiones de CO₂ es lo el resultado tras resolver la ecuación 32, a continuación:

$$\frac{0,04 \text{ ton CO}_2}{1 \text{ ton NH}_3} = \frac{x}{295.987 \text{ ton NH}_3} \quad (32)$$

$$x = 11.839 \text{ ton CO}_2$$

Y, para los siguientes años, estos se dan a conocer en la tabla 4.13:

Tabla 4.13: Emisiones de CO₂ liberadas hacia la atmósfera a tras producir amoniaco a partir del hidrógeno verde.

Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de Amoniaco Verde (Ton)	Emisiones de CO ₂ (Ton)
2021	295.987	11.839
2022	291.772	11.671
2023	287.618	11.505
2024	283.517	11.341
2025	279.465	11.179
2026	275.455	11.018
2027	271.484	10.859
2028	267.549	10.702
2029	263.647	10.546
2030	259.776	10.391

Por lo que se ha visto en el capítulo 3, la producción de hidrógeno gris libera 9,5 toneladas de CO₂ por cada tonelada de hidrógeno producidas (Figura 3.12). Por lo que para calcular la cantidad de CO₂ liberadas hacia la atmósfera entre los años 2021 y 2030, se utilizará la regla de tres simple (Tabla 4.12). Y, a modo de ejemplo se calcula el primero por medio de la ecuación 33:

$$\frac{9,5 \text{ ton CO}_2}{1 \text{ ton H}_2} = \frac{x}{52.233 \text{ ton H}_2} \quad (33)$$

$$x = 496.214 \text{ ton CO}_2$$

Mientras que para producir hidrógeno verde se liberan 0,9 toneladas de CO₂ (Figura 3.13). Esto quiere decir que para el año 2021 el resultado se verá a continuación tras resolver la ecuación 34:

$$\frac{0,9 \text{ ton CO}_2}{1 \text{ ton H}_2} = \frac{x}{52.233 \text{ ton H}_2} \quad (34)$$

$$x = 47.010 \text{ ton CO}_2$$

Resultando para los años 2021 hasta 2030, las siguientes cantidades de CO₂ por la producción de hidrógeno gris y verde (Ver tabla 4.14):

Tabla 4.14: Emisiones liberadas de CO₂ en la producción de hidrógeno gris y verde. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de hidrógeno (Ton)	Emisiones de CO ₂ – H ₂ gris (Ton).	Emisiones de CO ₂ – H ₂ verde (Ton).
2021	52.233	496.214	47.010
2022	51.489	489.146	46.340
2023	50.756	482.182	45.680
2024	50.032	475.304	45.029
2025	49.317	468.512	44.385
2026	48.610	461.795	43.749
2027	47.909	455.136	43.118
2028	47.214	448.533	42.493
2029	46.526	441.997	41.873
2030	45.843	435.509	41.259

4.2.3 Emisiones liberadas al producir nitrógeno

En base a lo indicado en la figura 3.12, por cada tonelada producida de nitrógeno se liberan 0,02 toneladas de CO₂. Por lo que, para el primero año se debe resolver la ecuación 35 para obtener el resultado del total de emisiones liberadas de CO₂:

$$\frac{0,02 \text{ ton CO}_2}{1 \text{ ton N}_2} = \frac{x}{243.754 \text{ ton N}_2} \quad (35)$$

$$x = 1.045 \text{ ton CO}_2$$

Resultando para los años 2021 hasta 2030, las siguientes cantidades de CO₂ por la producción de nitrógeno (Ver tabla 4.15):

Tabla 4.15: Emisiones liberadas de CO₂ en la producción nitrógeno. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Producción de nitrógeno (Ton).	Emisiones de CO₂ (Ton).
2021	243.754	4.875
2022	240.283	4.806
2023	236.862	4.737
2024	233.485	4.670
2025	230.147	4.603
2026	226.845	4.537
2027	223.575	4.472
2028	220.334	4.407
2029	217.121	4.342
2030	213.933	4.279

4.3 Evaluación económica planta generadora de hidrógeno verde

La realización de la evaluación económica por medio de un flujo de caja tiene las siguientes consideraciones:

- No es necesario estimar los costos de inversión relacionados a la producción de energía eólica, dado a que se asume la compra de esta.
- Los precios de venta se calculan con un mínimo margen de comercialización de un 30% con respecto a los costos de producción.
- Se asume una TREMA del inversionista de un 16%.
- Los impuestos corresponden a lo determinado por el SII, es decir, 27%.
- Se asume un capital de trabajo que cubra el 45% de los costos del primer año de actividad.
- Los activos se cambian cuando cumplen su vida útil real.
- El valor de desecho del proyecto se calcula por medio del método económico.
- La cantidad de equipos a utilizar se basan en las necesidades por cubrir del hidrógeno verde por cada año, entre el 2021 y 2030.
- Se asume un trabajo de la planta las 24 horas y 7 días, los 365 días del año.
- Los costos de producción contemplan:

- Materias primas.
- Energía.
- Mano de obra directa e indirecta.
- Servicios.
- Patente.
- Mantenimiento.
- Transporte.
- Se asume que los costos varios contemplan:
 - Terrenos.
 - Seguros.
 - Construcción.
 - Instalación.
 - Mantenimiento de equipos.

4.3.1 Costo producción de hidrógeno

En base a los costos de producción por cada kilo de hidrógeno vistos en las figuras 3.4 y 3.10, correspondientes al hidrógeno gris (a partir del reformado de hidrocarburos con vapor de agua) y verde (a partir de la electrolisis del agua con dos fuentes de energía renovable), respectivamente. Se estiman en la tabla 4.16, los precios que tendrían entre el 2020 y 2030 cada producción de una tonelada de H₂:

Tabla 4.16: Costos de producción del hidrógeno gris y verde entre el 2020 y 2030. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Costo producción hidrógeno gris (USD/Ton H ₂)	Costo producción hidrógeno verde (USD/ kg H ₂)		
		Electrólisis del agua – E. Eólica (Sur)	Electrólisis del agua – E. Solar (Norte)	Electrólisis del agua – E. Solar (Centro)
2020	1.500	2.100	2.600	3.400
2021	1.600	2.020	2.480	3.240
2022	1.650	1.940	2.360	3.080
2023	1.700	1.860	2.240	2.920
2024	1.800	1.780	2.120	2.760
2025	1.900	1.700	2.000	2.600
2026	1.930	1.620	1.880	2.440
2027	1.960	1.540	1.760	2.280
2028	1.980	1.460	1.640	2.120
2029	2.000	1.380	1.520	1.960
2030	2.100	1.300	1.400	1.800

Y, conociendo la cantidad de hidrógeno necesario para producir amoniaco entre los años 2021 y 2030, se ha logrado calcular los costos de producción de cada método para producir el total de hidrógeno necesario para fabricar todo el nitrato de amonio en Chile (Ver tabla 4.17).

Tabla 4.17: Costos de producción del hidrógeno gris y verde (USD/Ton). Fuente Imagen: (Elaboración propia).

Costos de producción (USD)					
Año	Producción (Ton)	Reformado de hidrocarburos con vapor de agua	Electrolisis del agua – E. Eólica (Sur)	Electrolisis del agua – E. Solar (Norte)	Electrolisis del agua – E. Solar (Centro)
2021	52.233	78.349.500	109.689.300	135.805.800	177.592.200
2022	51.489	82.382.400	104.007.780	127.692.720	166.824.360
2023	50.756	83.747.400	98.466.640	119.784.160	156.328.480
2024	50.032	85.054.400	93.059.520	112.071.680	146.093.440
2025	49.317	88.770.600	87.784.260	104.552.040	136.114.920
2026	48.610	92.359.000	82.637.000	97.220.000	126.386.000
2027	47.909	92.464.370	77.612.580	90.068.920	116.897.960
2028	47.214	92.539.440	72.709.560	83.096.640	107.647.920
2029	46.526	92.121.480	67.927.960	76.302.640	98.635.120
2030	45.843	91.686.000	63.263.340	69.681.360	89.852.280

En la tabla 4.17, se puede apreciar cómo a partir del año 2025 la producción de hidrógeno verde utilizando la energía eólica en la zona sur es la más económica. Razón por la cual, la evaluación económica por medio del flujo de caja solo se realiza para este caso.

4.3.2 Ingresos

Considerando un mínimo margen de comercialización del 30% con respecto a los costos de producción para el hidrógeno verde utilizando la energía eólica. Los ingresos se pueden apreciar en la tabla 4.18, a continuación:

Tabla 4.18: Precio de venta del hidrógeno verde, producido a partir de la electrolisis del agua utilizando energía eólica proveniente del sur. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Año	Costo producción hidrógeno gris (USD/Ton H ₂)	Precio de Venta - Electrolisis - E. Eólica Zona Sur (USD/Ton H ₂)
2020	1.500	2.730
2021	1.600	2.626
2022	1.650	2.522
2023	1.700	2.418
2024	1.800	2.314
2025	1.900	2.210
2026	1.930	2.106
2027	1.960	2.002
2028	1.980	1.898
2029	2.000	1.794
2030	2.100	1.690

4.3.3 Equipos

Los equipos necesarios para trabajar en la producción de hidrógeno verde fueron elegidos en base a la producción máxima necesaria entre los años 2021 y 2030. Lo cual ocurre en 2021, con una producción de 52.233 toneladas de hidrógeno. Por ende, se necesitan:

- 17 electrolizadores, con una producción de 3.880 [Nm³/h] y potencia de 4,1 kW/h cada uno.
- 17 compresores, con una capacidad de desplazamiento igual o mayor al flujo de producción del electrolizador, es decir, 3.880 [Nm³/h] y una potencia de 80 kW, cada uno.
- 17 purificadores de agua, capaz de refinar 3.074 l/h de agua con una potencia de 6,5 kW cada uno.
- 17 bombas de agua sumergible obtenida de grandes profundidades para el proceso de electrolisis, capaz de bombear mínimo 51 l/min.
- 17 bombas hidráulicas para desplazar 3.074 l/h de agua purificada hasta el electrolizador. Cada uno será capaz de desplazar máximo 3.600 l/h a una velocidad de 1.250 rpm.
- 17 tanques para almacenar 73.781 L de agua diarios, cada uno.
- 6 tanques para almacenar 141 toneladas de H₂ diarias.

Los costos, vida útil y valor de depreciación se obtuvieron de distintos catálogos respectivos de cada equipo. Estos se ven en la tabla 4.19, a continuación:

Tabla 4.19: Balance de equipos necesarios para la planta de hidrógeno verde.

Fuente Tabla: (Elaboración propia en base a cotizaciones).

Activo	Cantidad c/u	Costo Unitario (USD)	Vida útil real Años	Costo Total (USD)	Depreciación (USD)
Electrolizador (3.880 NM3/h)	17	\$388.000	20	\$6.596.000	\$329.800
Compresor (3.880 Nm3/h)	17	\$5.000	12	\$85.000	\$7.083
Purificador de agua (3.074 LHP)	17	\$10.000	20	\$170.000	\$8.500
Tanque de almacenamiento H2 (25 Ton)	6	\$20.000	20	\$120.000	\$6.000
Tanque de almacenamiento de agua (80.000 L/h)	17	\$17.870	20	\$303.790	\$15.190
Bomba Sumergible (167 L/min)	17	\$261	20	\$204.000	\$10.200
Bomba hidráulica (167 L/min)	17	\$100	20	\$1.700	\$85
Costos varios	1	\$10.000.000		\$10.000.000	

4.3.4 Flujo de caja

Con el fin de realizar el flujo de caja, se organizó el calendario de inversiones (Ver Anexo A.1) y depreciaciones (Ver Anexo A.2). Sin considerar el calendario de valor libro y ventas de activos, dado a que su vida útil esta fuera de la línea de tiempo considerada para este proyecto (10 años).

El desarrollo del flujo de caja se muestra en la tabla 4.20 y 4.21, a continuación:

Tabla 4.20: Flujo de caja en USA dólar. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos		137.163.858	135.210.114	128.006.632	120.977.376	114.119.538	107.428.100	100.896.354	94.522.428	88.306.348	82.242.342
Costo producción		-109.689.300	-104.007.780	-98.466.640	-93.059.520	-87.784.260	-82.637.000	-77.612.580	-72.709.560	-67.927.960	-63.263.340
Depreciación		-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879	-366.879
Utilidad a.i		27.107.679	30.835.455	29.173.113	27.550.977	25.968.399	24.424.221	22.916.895	21.445.989	20.011.509	18.612.123
Impuesto		-7.319.073	-8.325.573	-7.876.741	-7.438.764	-7.011.468	-6.594.540	-6.187.562	-5.790.417	-5.403.107	-5.025.273
Utilidad d.i		19.788.606	22.509.882	21.296.372	20.112.213	18.956.931	17.829.681	16.729.333	15.655.572	14.608.402	13.586.850
Depreciación		366.879	366.879	366.879	366.879	366.879	366.879	366.879	366.879	366.879	366.879
Valor de desecho											91.355.882
Inversión Dep.	-17.280.919										
Capital de trabajo	-49.360.185										
Flujo neto	-66.641.104	20.155.485	22.876.761	21.663.251	20.479.092	19.323.810	18.196.560	17.096.212	16.022.451	14.975.281	105.309.611
Valor Actual	-66.641.104	17.375.418	17.001.160	13.878.728	11.310.420	9.200.318	7.468.637	6.049.145	4.887.255	3.937.795	23.871.962
VAN	-66.641.104	-49.265.686	-32.264.525	-18.385.797	-7.075.377	2.124.941	9.593.578	15.642.723	20.529.978	24.467.773	48.339.735

Tabla 4.21: VAN, TIR, Periodo de recuperación y razón beneficio-coste. Fuente Tabla: (Elaboración propia).

VAN	\$48.339.735
TIR	31%
Periodo Recuperación	4,77
Razón B/C	1,27

5 Análisis de Resultados

5.1 Emisiones liberadas

En la figura 5.1 se puede apreciar la cantidad de ANFO que se estarían produciendo durante los años 2021 y 2030, los cuales fueron vistos en el capítulo 4, específicamente en la tabla 4.3.

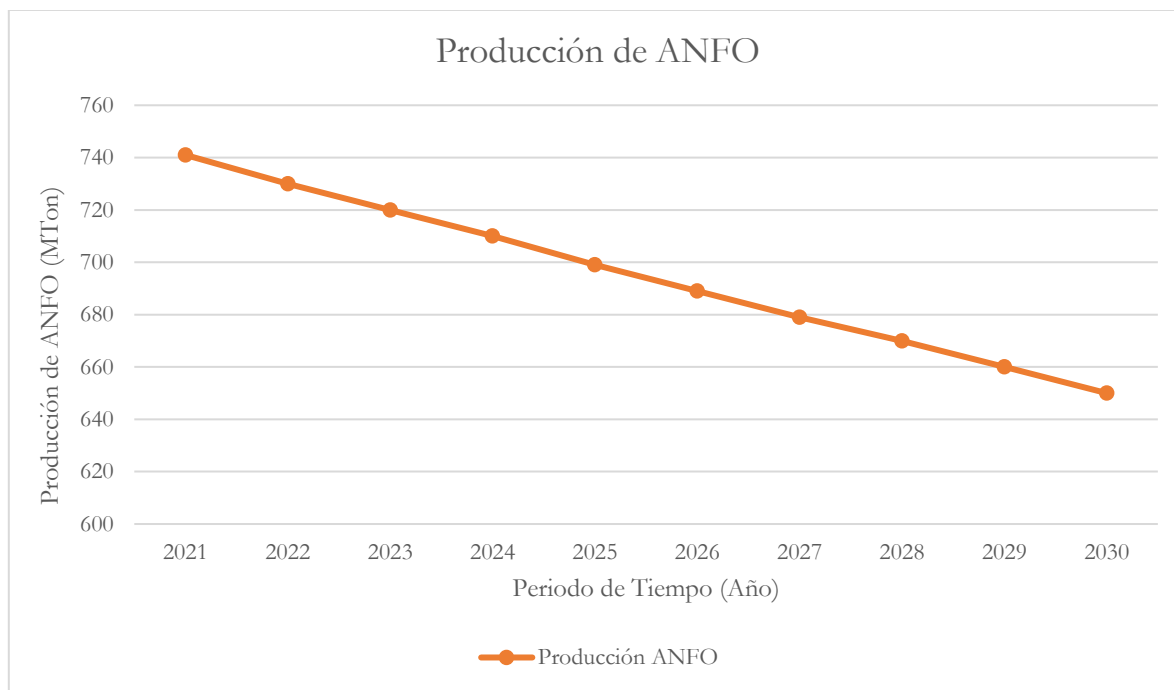


Figura 5.1: Producción de ANFO entre 2021 y 2030.

Fuente Imagen: (Elaboración propia).

En base a la cantidad de ANFO que se estaría produciendo durante el 2021 y 2030, existe una gran cantidad de emisiones de CO₂ liberadas hacia la atmósfera, y esto estaría variando, dependiendo del hidrógeno utilizado y su metodología de producción al igual que la energía utilizada.

En la figura 5.2, se puede analizar cómo la producción del ANFO a partir del hidrógeno gris libera entre 2 a 2,5 millones de toneladas cada año entre el 2021 y 2030. Mientras que, al utilizar el hidrógeno verde, existe una disminución en la cantidad de CO₂ liberadas hacia la atmósfera de un 47%, es decir, más de un millón de toneladas anuales reducidas en el caso de fabricar el ANFO con hidrógeno verde durante los próximos 10 años.

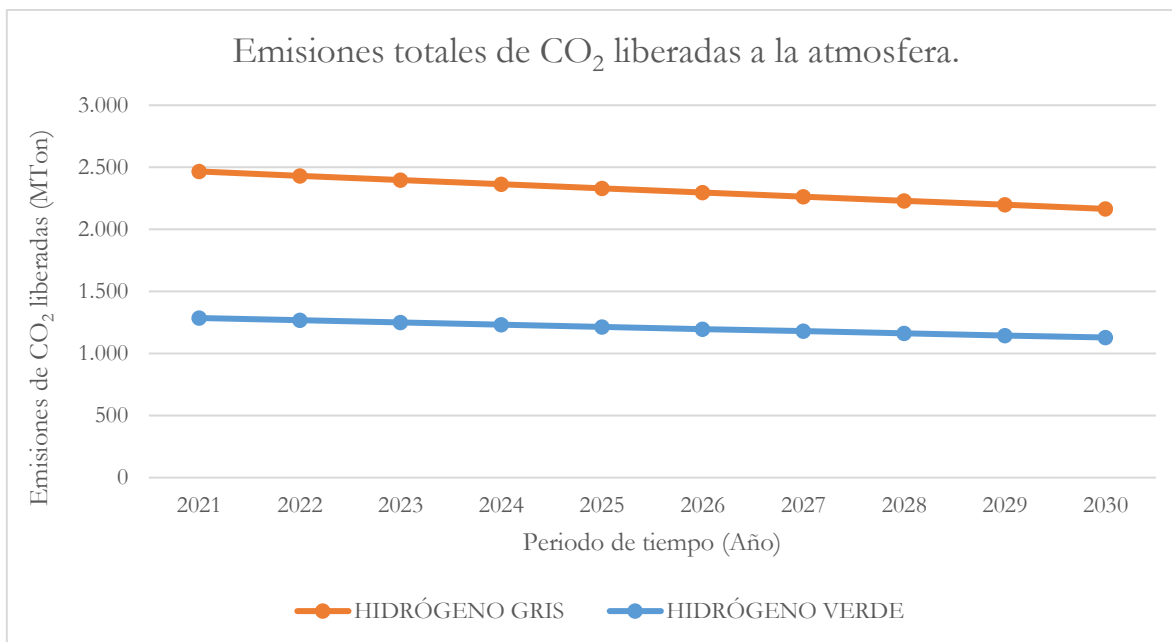


Figura 5.2: Total de emisiones de CO₂ liberadas al producir ANFO en base al hidrógeno gris y verde durante el 2021 y 2030.

Fuente Imagen: (Elaboración propia).

5.2 Costos

Los costos para producir una cantidad definida de hidrógeno gris a partir del reformado de hidrocarburo y del hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua por distintas fuentes de energías (visto en el capítulo 4), se ven reflejado en la figura 5.3, a continuación:

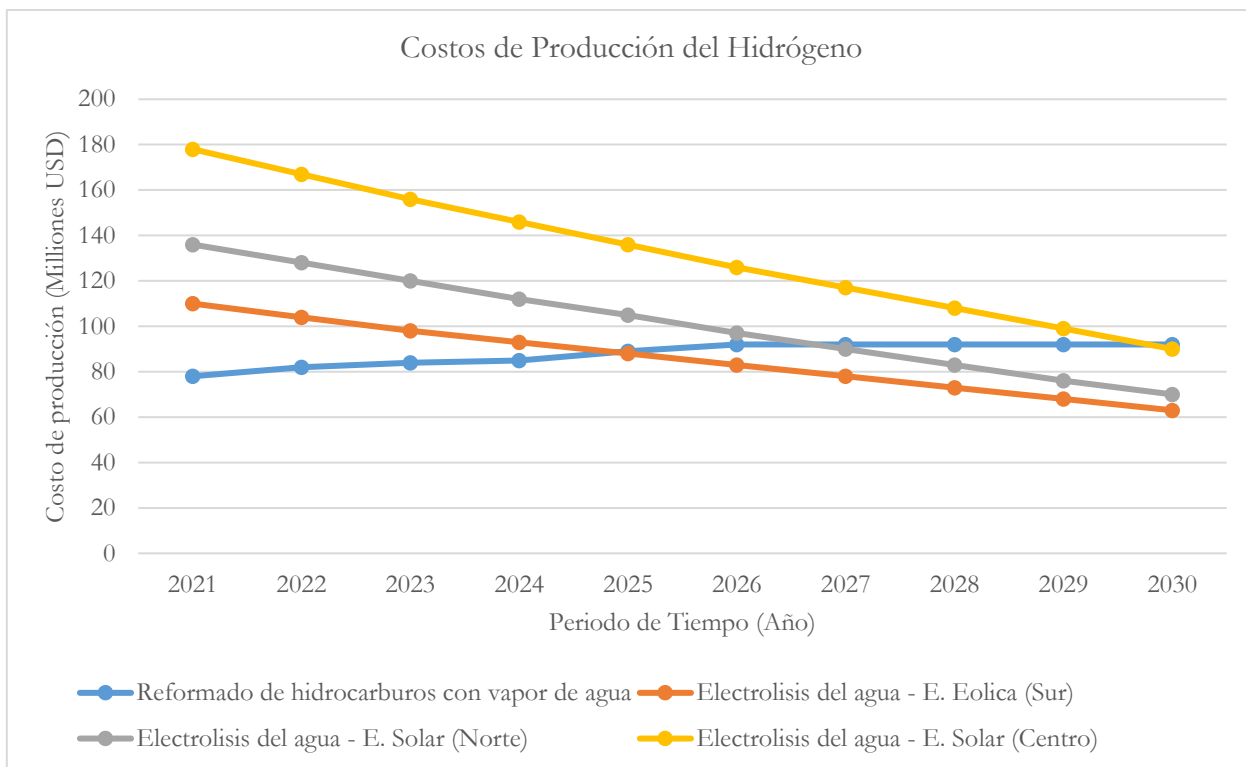


Figura 5.3: Costos de producción del hidrógeno gris y verde en base a la producción anual necesaria para producir amoníaco.

Fuente Imagen: (Elaboración propia).

En donde se puede reflejar el bajo costo del hidrógeno gris solo entre los años 2021 y 2024, pero cada año levemente comienza a aumentar el costo de producción definido con anterioridad. Mientras que desde el año 2021 el costo de producción del hidrógeno verde está en constante disminución, hasta alcanzar en 2025 el mismo costo de producción que el hidrógeno gris. Y, a partir de este año, el hidrógeno verde comienza a tener un costo de producción menor al hidrógeno gris, utilizando la energía solar o eólica para desarrollar la electrolisis del agua.

5.3 Evaluación económica

De acuerdo con los resultados vistos en la tabla 4.20, se observa que realizar un proyecto dirigido a una planta generadora de hidrógeno con un periodo de 10 años tiene una alta rentabilidad, exactamente de un 31%, con ganancias sobre los 45 millones de dólares, un tiempo de recuperación de las inversiones entre 4 a 5 años, y beneficios mayores que los costos del proyecto. Por ende, si desde este año se comienza a estudiar con mayor profundidad este proyecto y se inician las compras de terreno y equipo, construcciones, entre otros, con la idea de que en 2025

se inicien sus operaciones de producción de hidrógeno verde, año exacto en donde el hidrógeno verde comienza a ser menos costo que el hidrógeno gris, el proyecto será totalmente rentable dado a que será el más económico y el que menos liberaciones de CO₂ emita a la atmósfera.

6 Conclusión

En base a los estudios bibliográficos que se han llevado a cabo se puede concluir que la obtención del hidrógeno y amoníaco verde puede ser bastante positivo para el medio ambiente, tras disminuir la huella de carbono en la atmósfera más del 50%. Ya que estos insumos son esenciales en el proceso de fabricación de ANFO, se convierte en una alternativa atractiva para la generación de este explosivo utilizado ampliamente en la industria minera, contribuyendo en la disminución del impacto ambiental generado por la minería. Sin embargo, actualmente su costo de producción es bastante alto, tanto para la fuente de energía como para la obtención del hidrógeno verde.

Por ende, sobre la evaluación económica realizada se debe mencionar dos cosas. Primero, para este caso de estudio no se realizó la evaluación económica para una planta de energía como parte del proyecto, sino que se asumió como una empresa externa que suministra al proyecto actual estudiado lo que se requiere de energía cada año. Esto puede ser distinto en proyectos futuros, en donde la planta de energía sea parte del proyecto y requiera de una evaluación económica externa, para disminuir grandes costos en la evaluación económica de la planta de hidrógeno verde. Es decir, existen ahorros cuando es el mismo proyecto que suministra su propia energía, en vez de solicitar a otro proveedor que realice el mismo trabajo. Por lo que se recomienda realizar un estudio aún más profundo en este tema, agregando una completa evaluación económica de una planta de energía renovable. Segundo, en la actualidad es económicamente más rentable el hidrógeno gris, aunque para el año 2025 el hidrógeno verde alcanzaría un costo de producción menor que el hidrógeno gris, haciendo que económicamente sea competitivo y solucionando uno de los mayores problemas de nuestro planeta, la emisión de gases contaminantes.

Tras la evaluación económica realizada para una planta de hidrógeno verde, efectivamente llevar a cabo un proyecto con un mínimo periodo de 10 años de esta índole es bastante rentable, logrando ganancias por sobre los 48 millones de dólares, una rentabilidad del 31%, y un periodo de recuperación entre 4 a 5 años. Resultados que dan confianza y seguridad que una planta de hidrógeno será rentable, y un estudio bibliográfico que demuestra la capacidad de trabajar este gas para la fabricación del ANFO.

También se debe mencionar que los procesos de obtención del nitrógeno y nitrato de amonio siguen liberando la misma cantidad de gases contaminantes, aun cuando se esté utilizando el hidrógeno gris o verde. Por lo que ambos aún son grises, razón por la cual se debe seguir actuando en las mejoras de ellos para que cada etapa clave en el proceso de fabricación del ANFO sea sustentable y sus costos se mantengan similares a los actuales.

Finalmente, se recomienda continuar con este estudio, explorando soluciones para disminuir la cantidad de emisiones liberadas en la obtención de nitrógeno y nitrato de amonio. Dado a que son producciones que no se vieron afectadas significativamente en la contaminación que generan hacia el medio ambiente, pero puede ser un gran cambio en el futuro para continuar disminuyendo las emisiones liberadas de CO₂ en cada etapa que con lleva fabricar el explosivo ANFO y aun así seguir manteniendo o disminuir sus costos de producción.

7 Referencias

Abellán, Alfonso. 2013. Estudio de los riesgos generados por agentes químicos en la fabricación de explosivos. Máster interuniversitario de prevención de riesgos laborales especialidad: 124 pp.

ACS Chemistry for life. How a Solar Cell Works.

<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>

Alvites, S.E; Dolong, M.A. 2015. Diseño de planta para la producción de nitrato de amonio por el proceso UHDE. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Trujillo, Perú. Universidad Nacional de Trujillo. 341 pp.

Angeles, G. 2009. Conservación ambiental y desarrollo rural al aplicarse tecnología fotovoltaica. Estudio de caso en Tapanatepex, Oaxaca. Maestría con especialidad en medio ambiente y desarrollo integrado. Ciudad de México, México. Instituto Politécnico Nacional: 235 pp.

Atlas Copco. s.f. High Pressure CNG Refueling Solutions: 24 pp. Germany.

Badía, Clara. 2005. Energética del Hidrógeno: Contexto, Estado Actual, y Perspectivas de futuro. Universidad de Sevilla. Departamento de Energética y Mecánica de Fluidos: 14 pp. Sevilla.

Benito, Y. 2016. Guía Específica de Trabajo sobre “CO₂ y cambio climático”. Consultado 29 de oct. 2020. <https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2016-17/Guia%20introdutoria%20al%20tema%20CO2%20y%20cambio%20climatico.pdf>

Bezares s.a. 2020. Catálogo Técnico Elementos Hidráulicos. Bezares Headquarters: 316 pp. España.

Bonnin, Jaume. 2019. Proyecto Básico de Actividad Power to Green Hydrogen. Cemex: 84 pp. Lloseta.

Bórquez, Felipe. 2013. Estudio de prefactibilidad de una planta de producción de hidrógeno a partir de energía eólica. Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Universidad Austral de Chile, Escuela de Ingeniería Civil Industrial: 98 pp. Chile.

Calise F.; Dentice M.; Santarelli M.; Lanzini A. & Ferreo D. 2019. Solar Hydrogen Production. Elsevier Inc: 569 pp. India.

Chacon, Ana. 2016. Elaboración de un manual de procedimientos para pruebas de evaluación de calidad en la producción de ANFO. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química: 113 pp. Costa Rica.

Chacon, Jesús. 2018. Utilización de emulsión gasificable en voladura para optimizar factores ambientales, técnicos y económicos en Minería a Tajo Abierto. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas: 109 pp. Perú.

Chaín, Nassir. 2007. Proyectos de inversión – Formulación y evaluación. Primera Edición. Pearson Educación de México S.A de C.V: 488 pp. Perú.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae beats bioetanol. Trends in Biotechnology. Elsevier Ltd: 126 – 131 pp. Palmerston North.

Codelco, s.f. Desperdicios Útiles. Consultado 13 de mar. 2021. https://www.codelco.com/desperdicios-utiles/prontus_codelco/2011-02-18/093857.html

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecommunication, 2002. Energía Solar Fotovoltaica. Ibergraphi, S.L.L: 122 pp. Madrid.

Correa M.; Barría C. & Maluenda B. 2020. Estrategia Nacional Hidrógeno Verde. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile: 33 pp. Santiago de Chile.

Dávilla, A. 2013. Estudio de los Riesgos generados por agentes químicos en la fabricación de explosivos. Máster interuniversitario de prevención de riesgos laborales especialidad: Higiene industrial.

De Gruyter, 2018. IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes (IPTEI) for the Education Community (IUPAC Technical Report). Consultado 10 de sep. 2020. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/pac-2015-0703/html>

Diario Financiero, 2021. Engie y Enaex irrumpen en carrera por el hidrógeno verde: apuntan a operar planta piloto hacia 2024. Consultado 10 de oct. 2020. Engie y Enaex irrumpen en carrera por el hidrógeno verde: apuntan a operar planta piloto hacia 2024 - Diario Financiero (df.cl)

Distrisoluciones MC S.A.S. sf. Tanque de Almacenamiento de agua 80.000 Litros. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA 80.000 LITROS - DistrisolucionesMC S.A.S

Ecostandar, s.f. Nitrato de amonio, uso fertilizante y explosivo ANFO. Consultado 20 abr. 2021. <https://ecostandard.cl/nitrato-de-amonio-uso-fertilizante-y-explosivo-anfo/>

Enaex S.A. 2019. Memoria Anual 2019 Enaex S.A. Consultado 5 de abr. 2021. <https://www.enaex.com/wp-content/uploads/2020/04/Memoria-2019-2.pdf>

Enaex S.A. 2020. Memoria Anual 2020 Enaex S.A. Consultado 5 de abr. 2021. <https://www.cmfchile.cl/institucional/mercados/entidad.php?mercado=V&rut=90266000&grupo=&tipoentidad=RVEMI&row=&vig=VI&control=svs&pestanía=49>

Energía, s.f. Energía Termosolar: Todo lo que necesitas saber. Consultado 13 Ago. 2020. <https://tiposdeenergia.online/solar-termosolar/>

Espinosa M. 2016. Guía de calidad del aire y educación ambiental. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile: 103 pp. Santiago de Chile.

Fagilde, C. 2009. Presupuesto Empresarial. Programa de Ciencias Sociales: 79 pp. Barinas.

Galdames, A. 2021. Procesos de fabricación del ANFO en ENAEX. Entrevista realizada por Jocelyn Rojas por medio de la plataforma Zoom.

Gaete, R. 2020. Hidrógeno Verde: Una propuesta de valor desde las emisiones. Asociación Chilena de Hidrógeno: 16 pp.

Giraldo, E.M. 2020. Formulación óptima de ANFO aluminizado para voladuras en minería subterránea. N° 46, Vol. 23: 95 – 102. Lima, Perú.

Global Solar Atlas, 2019. Global Solar Atlas. Consultado 28 Mar. 2021 https://worldbank-atlas.s3.amazonaws.com/download/World/World_PVOUT_mid-size-map_160x95mm-300dpi_v20191015.png?AWSAccessKeyId=ASIAS2HACIWTAWQU7SNQ&Expires=1610294528&Signature=yIN91XB1UO6HSukud19M0LIyrm8%3D&x-amz-security-token=IQoJb3JpZ2luX2VjEMf%2F%2F%2

Global Wind Atlas, 2019. Global Wind Atlas. Consultado 28 Mar. 2021 <https://globalwindatlas.info/>

Hernández, C. 2015. Proyecto de Energías renovables en el mar: Validación del uso del código CFD en el diseño de plataformas. Memoria para optar al Título de Ingenieritza Goi Eskola Teknikoa. Universidad del País Vasco, Escuela Técnica Superior de Ingeniería: 54 pp., Bilbao.

Hernández, S.; Leyva, A. 2005. Análisis y Aprovechamiento de la Energía Mareomotriz para la Generación Eléctrica en México. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Eléctrico y Electrónico. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería: 161 pp., México, D.F.

Inacap. s.f. Extracción Mina I: Apuntes Explosivos. Universidad Tecnología de Chile. Instituto profesional, Centro de formación técnica: 154 pp. Chile.

I. Rafiqul C. Weber, B. Lehmann, A. Voss: 2005. Energy efficiency improvements in ammonia production-perspectives and uncertainties, Energy: 2487-2504 pp.

Kirova-Yordanova, Z. 2010. Application of the exergy method to environmental impact estimation: The ammonium nitrate production as a case of study. Energy: 3221 - 3229 pp. Bourgas.

Kirova-Yordanova, Z. 2017, Exergy-based estimation and comparison of urea and ammonium nitrate production efficiency and environmental impact. Energy. Elsevier Ltd. Department of Inorganic Technology: 158 – 169. Bourgas.

López, J.M. 2006. Energía Solar Térmica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: 148 pp. Madrid.

López, M. 2013. Ingeniería de la Energía Eólica. Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V: 284 pp. México.

Mellado, F. 2002. Energía Solar Fotovoltaica. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación: 122 pp. Madrid.

Ministerio de Energía, 2020. Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Consultado 16 Mar. 2021 https://energia.gob.cl/sites/default/files/mini-sitio/estrategia-nacional_hidrogeno-verde_vdef.pdf

Ministerio del Medio Ambiente, 2016. Guía de Calidad del Aire y Educación Ambiental. Gobierno de Chile: 103 pp. Santiago de Chile.

Moragues, Jaime; Rapallini, Alfredo. 2003. Energía Eólica. Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”: 22 pp. Argentina.

Morlanés Sanchez, N. 2007. Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua. Universidad Politecnica de Valencia: 561 pp. Valencia.

Motor y Movilidad, 2019. ¿Que son las emisiones NOx y cómo te afectan como conductor? Consultado 25 de oct. 2020. <https://www.20minutos.es/noticia/3585238/0/que-son-emisiones-nox-coches-conductores/>

Nel ASA. 2021. Atmospheric Alkaline Electrolyser. Atmospheric Alkaline Electrolyser | Nel Hydrogen

Murray, A. 2018. Markham Energy Storage Facility. Hydrogenics Shift Power, Energize Your World: 14 pp. Mississauga.

Olabi, A.G et al. 2020. Large-vsacle hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. International Journal of Hydrogen. Elsevier Ltd. Hydrogen Energy Publications LLC: 1 - 31 pp. Sharjah.

Ordóñez, G. 2009. Conservación ambiental y desarrollo rural al aplicarse tecnología fotovoltaica. Estudio de caso en Tapanatepec, Oaxaca. Tesis para obtener el Grado de Maestría con Especialidad en Medio Ambiente y Desarrollo Integrado. Instituto Politécnico Nacional: 235 pp. México.

Paredes, E. 2020. Formulación óptima de ANFO aluminizado para voladuras en minería subterránea. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, Volumen 23, 95 – 102 pp. Lima.

Pineda, D.A. 2009. Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Chile. Universidad de Chile. / 128.

Pino, A. 2009. Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrogeno. Ingeniero de Organización Industrial: 197 pp. Sevilla.

Rafiqul, I.; Weber, C.; Lehmann, B.; Voss, A. 2005. Energy Efficiency Improvements in ammonia – perspectives and uncertainties. Energy, Elsevier, vol. 30 (13): 2487 – 2504 pp. Germany.

Rebolledo, M. 2008. Estudio de Prefactibilidad Técnico y Económica de una Planta de Amoniaco. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 222 pp.

Ribeiro, D. 2013. Proceso de Haber-Bosch. Revista de Ciencia Elementar, Volumen 1.
https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_1_num_1_26_art_processoHaberBosch.pdf

Rivas, P. 2020. Instalaciones y eficiencia energética. Consultado 10 oct. 2020
<https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/como-funciona-la-energia-solar-termica/>

Sanchez, N. 2007. Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua. Instituto de Tecnología Química. 561 pp. España.

Sangay, W. 2014. Análisis de factibilidad para el uso de ANFO pesado a base de emulsión gasificable en minera Yanacocha. Título para optar por el título de Ingeniero de Minas. Pontificia Universidad Católica del Perú: 83 pp. Perú.

Sanz, J.L. 1993. Manual para el control y diseño de voladuras en obras de carreteras. EINSA Ediciones Informa Tizadas, S.A.: 390 pp. Madrid.

Sequiera, C.A.C.; Santos, D. M. F. 2009. Electrochemical Routes for Industrial Synthesis. Sociedade Brasileira de Química: 20 pp. Portugal.

Suppajariyawat, P.; Elie, M.; Baron, M.; Gonzalez, J. 2019, Classification of ANFO samples based on their fuel composition y GC-MS and FTIR combined with chemometrics. Forensic Science International. Elsevier B.V. Central Institute of Forensic Science: 415 – 425, United Kingdom.

Sureda, J. 2019. Proyecto Básico de Actividad Power to Green Hydrogen. Planta de Electrolisis Integrada con un Parque Fotovoltaico. Promotor: Cemex SA: 84 pp.

UNAM, 2016. Acido Nítrico. Consultado 25 de oct. 2020. <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/6nitrico.pdf>

Vásquez, R.; Salinas, F. 2018. Tecnologías del Hidrógeno y Perspectivas para Chile. Ministerio de Energía: 135 pp. Santiago de Chile.

Vilela, W. 2014. Análisis de factibilidad para el uso de ANFO pesado a base de emulsión gasificable en Minera Yanacocha. Tesis para optar por el Título de Ingeniero de Minas. Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería: 83pp., Lima.

Villarrubia, M. 2013. Ingeniería de la energía eólica. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.: 284 pp. México.

Zornitza K.Y. 2010. Application of the exergy method to environmental impact estimation: The ammonium nitrate production as a case study. Energy. Elsevier Ltd: 8 pp. Bulgaria.

IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes

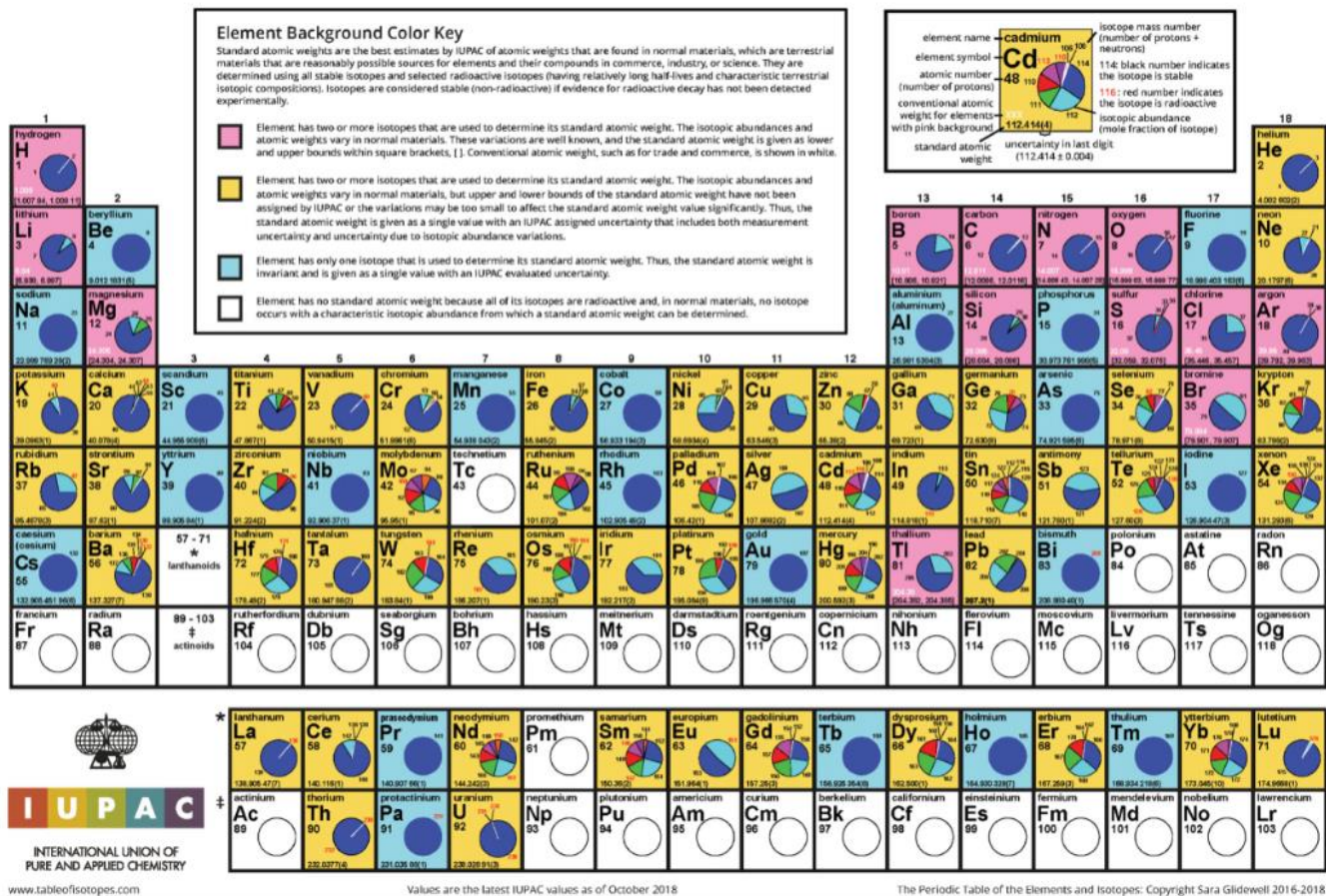


Figura A.1: Tabla Periódica.

Fuente Imagen: (DE Gruyter, 2018).

Tabla A.1: Calendario de inversiones.

Fuente Tabla: (Elaboración propia en base a cotizaciones).

Ítem	Año 0
Electrolizador (3.880 NM3/h) (USD)	\$6.596.000
Compresor (3.880 Nm3/h) (USD)	\$85.000
Purificador de agua (3.074 LHP) (USD)	\$170.000
Tanque de almacenamiento H2 (25 Ton) (USD)	\$120.000
Tanque de almacenamiento de agua (80.000 L/h) (USD)	\$303.790
Bomba sumergible (USD)	\$4.429
Bomba hidráulica (USD)	\$1.700
Costos varios (USD)	\$10.000.000
Total (USD)	\$17.280.919

Tabla A.2: Calendario de depreciación.

Fuente Tabla: (Elaboración propia).

Ítem	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Electrolizador (3.880 NM3/h) (USD)		\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800	\$329.800
Compresor (3.880 Nm3/h) (USD)		\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083	\$7.083
Purificador de agua (3.074 LHP) (USD)		\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500	\$8.500
Tanque de almacenamiento H2 (25 Ton) (USD)		\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000	\$6.000
Tanque de almacenamiento de agua (80.000 L/h) (USD)		\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190	\$15.190
Bomba Sumergible (USD)		\$221	\$221	\$221	\$221	\$221	\$221	\$221	\$221	\$221	\$221
Bomba hidráulica (USD)		\$85	\$85	\$85	\$85	\$85	\$85	\$85	\$85	\$85	\$85
Costos varios		-	-	-	-						
Total		\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879	\$366.879

