

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 amoníaco para distintos tipos de combustibles y tecnologías utilizadas.....	40
Tabla 3.6: Emisiones producidas en la producción de nitrato de amonio y sus intermedios: amoníaco 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 amoníaco, oxígeno, ácido nítrico y agua.....	49
Tabla 4.5: Gramaje total del amoníaco, ácido nítrico, y nitrato de amonio.	50
Tabla 4.6: Tonelaje total de amoníaco 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 amoníaco gris, entre 2021 y 2030.	53
Tabla 4.8: Emisiones liberadas en el proceso de producción del nitrato de amonio tras utilizar amoníaco 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 amoníaco.....	55
Tabla 4.11: Cantidades de hidrógeno y nitrógeno necesarios para producir amoníaco 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