

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Alcances	4
2. Antecedentes	5
2.1. Propiedades del hidrógeno	5
2.2. Producción del hidrógeno	6
2.2.1. Electrólisis	7
2.2.1.1. Electrolizadores alcalinos (AE)	8
2.2.1.2. Electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM)	8
2.2.1.3. Electrolizadores de óxido sólido (SOE)	9
2.2.1.4. Electrolizadores de membrana de intercambio de aniones (AEM)	10
2.2.1.5. Comparación de tecnologías de electrólisis	10
2.2.2. Costos de producción	11
2.3. Almacenamiento del hidrógeno	12
2.3.1. Hidrógeno gaseoso	13
2.3.1.1. Proceso de compresión	13
2.3.1.2. Almacenamiento del hidrógeno gaseoso comprimido (CGH_2)	15
2.3.2. Hidrógeno líquido	18
2.3.2.1. Proceso de licuefacción	18
2.3.2.2. Almacenamiento del hidrógeno líquido criogénico (LH_2)	21
2.3.3. Hidruros metálicos	22
2.4. Aplicaciones del hidrógeno	23
2.4.1. Aplicaciones convencionales	24
2.4.1.1. Refinería de petróleo	24
2.4.1.2. Industria química	25
2.4.1.3. Industria metalúrgica	26
2.4.1.4. Producción de vidrio	26
2.4.1.5. Industria alimentaria	26
2.4.2. Aplicaciones de transporte	27
2.4.3. Aplicaciones estacionarias	28

2.4.3.1.	Grandes consumidores	28
2.4.3.2.	Sistema eléctrico	28
2.4.3.3.	Energía de respaldo	29
2.4.4.	Aplicaciones móviles	29
2.4.5.	Uso del hidrógeno como gas	29
2.5.	Escenario del hidrógeno Chile	30
2.5.1.	Seguridad en el uso del hidrógeno y normativas vigentes	30
2.5.2.	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	31
2.6.	Antecedentes básicos sobre el oxígeno	32
2.7.	Mercado eléctrico chileno	33
3.	Metodología	35
4.	Ingeniería Conceptual	37
4.1.	Caracterización de la demanda	37
4.1.1.	Actualidad del hidrógeno verde en Chile	37
4.1.2.	Potencial del hidrógeno verde en Chile	39
4.1.2.1.	Combustibles para camiones mineros	39
4.1.2.2.	Industria metalúrgica	40
4.1.2.3.	Ampliación de los usos del amoniaco	41
4.1.2.4.	Inyección de H_2 en cañerías de gas	41
4.1.2.5.	Resumen del potencial del H_2 verde en Chile	42
4.2.	Selección del mercado objetivo	44
4.3.	Emplazamiento de la planta	44
4.3.1.	Identificación de la zona	44
4.3.2.	Disponibilidad de recursos	45
4.3.2.1.	Recursos energéticos	45
4.3.2.2.	Recursos hídricos	49
4.3.3.	Consideraciones ambientales	51
4.3.4.	Selección de la ubicación	52
4.4.	Definición de la capacidad de la planta	54
4.5.	Selección de tecnologías	55
4.6.	Esquema conceptual de la planta	56
5.	Ingeniería Básica	57
5.1.	Selección de equipos y dimensionamiento	57
5.1.1.	Electrolizador	57
5.1.2.	Acondicionamiento del H_2 para su aprovechamiento	58
5.1.2.1.	Sistema de compresión del hidrógeno	59
5.1.2.2.	Intercambiadores de calor para el hidrógeno	62
5.1.3.	Acondicionamiento del O_2 para su almacenamiento	65
5.1.3.1.	Sistema de compresión del oxígeno	65
5.1.3.2.	Intercambiadores de calor para el oxígeno	67
5.1.4.	Equipos auxiliares	69
5.1.4.1.	Bomba para agua de proceso	69
5.1.4.2.	Bomba para agua de servicio	70
5.1.4.3.	Intercambiador de calor para agua de electrólisis	71
5.1.4.4.	Torre de enfriamiento	73

5.1.4.5. Otros equipos	76
5.2. Diagrama de flujos de la planta	77
5.3. Consumo energético total	79
5.4. Escalamiento de la planta de H_2	79
6. Evaluación económica	81
6.1. Casos de estudio	81
6.2. CAPEX	81
6.3. OPEX	84
6.3.1. Costos de operación variables	84
6.3.2. Costos de operación fijos	85
6.4. Ingresos	87
6.5. Depreciación	88
6.6. Flujos de caja	89
6.6.1. Supuestos considerados	89
6.6.2. Indicadores económicos	89
6.6.3. Resultados de flujos de caja para proyecto puro	90
6.6.4. Resultados de flujos de caja para proyecto financiado	91
6.7. Costo nivelado del hidrógeno (LCOH)	92
6.8. Alternativa de régimen de operación <i>ongrid</i>	92
6.9. Análisis de sensibilidad	93
6.9.1. Variación en el costo de la electricidad	93
6.9.2. Variación en el precio de la tecnología	95
7. Discusión	98
8. Conclusiones	103
Bibliografía	106
Anexos	110
A. Curva de operación torre de enfriamiento	110
B. Diagramas de flujos de plantas de 6,5 y 11,5 [$ton_{H_2}/día$]	111
C. Gráficos de análisis paramétrico	113
D. Evolución de costos de electricidad	115
E. Flujos de caja proyecto puro	116
F. Flujos de caja proyecto financiado	128
G. Flujos de caja alternativa <i>ongrid</i>	140
H. Análisis de sensibilidad para plantas de 11,5 y 16,5 [$ton_{H_2}/día$]	146