

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
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
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>35</b>
<b>4.</b>	<b>Ingeniería Conceptual</b>	<b>37</b>
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
<b>5.</b>	<b>Ingeniería Básica</b>	<b>57</b>
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
<b>6. Evaluación económica</b>	<b>81</b>
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
<b>7. Discusión</b>	<b>98</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>103</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>106</b>
<b>Anexos</b>	<b>110</b>
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