

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	4
1.3. Objetivos específicos	4
1.4. Supuestos y alcances	4
1.5. Estructura del documento	5
2. Antecedentes sobre el desarrollo y uso del hidrógeno	6
2.1. Economía del hidrógeno y aspectos globales	6
2.1.1. Hidrógeno y sus variedades	6
2.1.2. Situación global del hidrógeno y usos actuales	8
2.1.3. Evolución y desafíos de un sistema basado en energías renovables	10
2.1.4. Resurgimiento del hidrógeno como vector de energía	14
2.1.5. Relaciones internacionales y futuros proyectos	19
2.2. Oportunidades de Chile	22
2.2.1. Gran capacidad renovable y potencial productor de hidrógeno	22
2.2.2. Chile, país minero	23
2.2.3. Inyección en las redes de gas	24
2.2.4. Beneficios al descarbonizar los usos actuales del hidrógeno	26
2.2.5. Beneficios del comercio internacional	28
2.2.6. Oportunidad hídrica y fomento a una cultura del agua	30
2.2.7. Creación de empleos	33
2.3. Barreras y características del mercado de hidrógeno verde	33
2.4. Red de suministro del hidrógeno	40
2.5. Rutas del hidrógeno	42
2.6. Descripción tecnologías de electrólisis	45
2.7. Competitividad de los electrolizadores	47
2.7.1. Conexión y suministro de energía	48
2.7.2. Flexibilidad	50
2.8. Valor de mercado de los electrolizadores	53
2.8.1. Subproducto de la electrólisis: Oxígeno	53
2.8.2. Sensibilidad de los parámetros	54
2.8.3. Sobredimensionamiento del electrolizador PEM	56
2.8.4. Factibilidad tecno-económica por conexión	58
2.8.5. Modelo de negocio: Mercado de hidrógeno v/s Mercado de electricidad	60

2.8.6.	Venta de hidrógeno: Mercado Spot v/s Contrato tipo PPA	61
2.8.7.	Estudios aplicados a Chile	62
2.9.	Acondicionamiento del hidrógeno	68
2.9.1.	Compresión	70
2.9.2.	Licuefacción	72
2.9.3.	Crio-comprimido	74
2.9.4.	Amoníaco	75
2.9.5.	Combustibles líquidos	81
2.9.6.	Metanol	84
2.9.7.	Metano	91
2.10.	Transporte	96
2.10.1.	General	96
2.10.2.	Camión con remolque de hidrógeno gaseoso	99
2.10.3.	Camión con remolque de hidrógeno líquido	99
2.10.4.	Gasoductos	100
2.10.5.	Barcos	101
2.11.	Almacenamiento	103
2.11.1.	General	110
2.11.2.	Tanques de hidrógeno presurizados	114
2.11.3.	Tanques de hidrógeno criogénicos	121
2.11.4.	Cavernas de sal	122
2.12.	Usos finales	125
2.12.1.	Re-electrificación con hidrógeno	125
2.12.2.	Calor	136
2.12.3.	Vehículos	139
2.13.	Planificación de redes de suministro	139
2.13.1.	Referencias históricas	139
2.13.2.	Tendencias generales de diseño	141
2.13.3.	Enfoques de diseño	142
2.13.4.	Modelo LEELO	144
3.	Propuesta metodológica	146
3.1.	Descripción del problema	146
4.	Propuesta metodológica	147
4.1.	Descripción del problema	147
4.2.	Estructura del modelo y componentes	148
4.2.1.	Características y supuestos	148

4.2.2.	Demanda	150
4.2.3.	Nodos	151
4.2.4.	Generación renovable	151
4.2.5.	Unidades de almacenamiento	151
4.2.6.	Modos de transporte	153
4.2.7.	Tecnologías de conversión	154
4.3.	Modelación matemática	157
4.3.1.	Conjuntos	157
4.3.2.	Parámetros	158
4.3.3.	Variables	162
4.3.4.	Cálculo de escalares	165
4.3.5.	Función objetivo	167
4.3.6.	Generación convencional, renovables e hidráulicas de pasada	170
4.3.7.	Generación concentración solar de potencia	171
4.3.8.	Sistemas de almacenamiento	173
4.3.9.	Tecnologías de conversión	178
4.3.10.	Modos de transporte	181
4.3.11.	Ecuaciones de balance	184
4.3.12.	Multiservicios	193
5.	Implementación y validación del modelo	198
6.	Caso de Estudio: Tarapacá	199
6.1.	Descripción general	199
6.2.	Aplicación del modelo	202
6.2.1.	Configuración desarrollada	202
6.2.2.	Obtención de la demanda	205
6.2.3.	Clasificación de nodos y supuestos de caso	206
6.2.4.	Problema original y adecuación del modelo	206
6.2.5.	Caso Base: referencia de análisis	208
6.2.6.	Situación hipotética 1: Tarapacá autárquico	210
6.2.7.	Situación hipotética 2: Tarapacá compite	211
6.2.8.	Situación hipotética 3: Escalamiento de demanda nacional	211
6.2.9.	Situación hipotética 4: Tarapacá exporta	212
6.2.10.	Situación hipotética 5: Restricción modos de transporte	212
6.2.11.	Situación hipotética 6: Consumo de agua agropecuaria	213
6.2.12.	Situación hipotética 7: Restricción nodos de exportación	214
6.2.13.	Situación hipotética 8: Multiservicios	214

6.2.14. Situación hipotética 9: Restricción tecnologías sinérgicas	215
6.2.15. Situación hipotética 10: Variación tasa de interés	215
6.2.16. Situación hipotética 11: Variación temporal de la demanda en vectores de hidrógeno	216
7. Resultados y análisis	217
7.1. Resultados caso base	217
7.2. Escenarios e indicaciones generales	219
7.3. Primer análisis: Tarapacá autárquico vs Tarapacá compite	225
7.4. Segundo análisis: Ponderación de demandas en 10 para 200, 350 y 700 bar .	227
7.5. Tercer análisis: Exportación de LH_2 vs NH_3 vs MeOH vs Mixto	227
7.6. Cuarto análisis: Exportación concentrada en un solo nodo	227
7.7. Quinto análisis: Restricciones de transporte	228
7.8. Sexto análisis: Suplir demanda de agua desalada agropecuaria	228
7.9. Séptimo análisis: Cambio en la tasa de interés	228
7.10. Octavo análisis: Aplicación del multiservicio	228
7.11. Noveno análisis: Restricción de sinergias	228
7.12. Décimo análisis: Variación curvas de demanda	228
8. Conclusiones y trabajo futuro	230
8.1. Conclusiones	230
8.2. Trabajo futuro	232
9. Bibliografía	233
A. Anexo: Respaldos de simulaciones	247