

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances	3
2. Marco teórico	5
2.1. Energías renovables: Definición y usos en Chile	5
2.1.1. Definición de energías renovables	5
2.1.2. Generación de energía en Chile	9
2.1.3. Potencial de energías renovable en Chile	11
2.2. Energía Eólica	11
2.2.1. Principio de funcionamiento aerogenerador	11
2.2.2. Características del recurso eólico	12
2.2.2.1. Variabilidad del recurso	13
2.2.2.2. Perfil vertical del viento	13
2.2.3. Curva de potencia aerogenerador	14
2.2.4. Rugosidad del emplazamiento	15
2.2.5. Efecto estela	16
2.3. Métodos de producción del hidrógeno verde	17
2.3.1. Procesos Termoquímicos	17
2.3.2. Procesos Electrolíticos	18
2.4. Almacenamiento del hidrógeno verde	22
2.4.1. Almacenamiento físico	23
2.4.1.1. Almacenamiento por compresión	23
2.4.1.2. Almacenamiento por licuefacción	27
2.4.2. Almacenamiento en sólidos	34
2.5. Transporte de hidrógeno verde	34
2.5.1. Transporte en tuberías	34
2.5.2. Transporte en contenedores	35
2.6. Aplicaciones del hidrógeno verde	36
2.6.1. Aplicaciones convencionales	36
2.6.2. Aplicaciones en transporte	38
2.6.2.1. Combustión directa	38
2.6.2.2. Celdas de combustible	40

2.6.3.	Aplicaciones estacionarias	42
2.6.3.1.	Grandes y pequeños consumidores	42
2.6.3.2.	Almacenamiento para la red eléctrica	43
2.7.	Seguridad en el uso de hidrógeno	44
2.8.	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	45
3.	Metodología	47
4.	Ingeniería conceptual de la planta de hidrógeno verde	48
4.1.	Selección de la aplicación de hidrógeno verde	48
4.1.1.	Hospital Regional de Concepción	50
4.1.2.	Abastecimiento con hidrógeno verde Hospital Regional de Concepción. . .	53
4.1.3.	Consumo energético Hospital Regional de Concepción	54
4.1.3.1.	Consumo eléctrico	55
4.1.3.2.	Consumo térmico	57
4.1.4.	Consumo de oxígeno	71
4.1.4.1.	Consumo de oxígeno criogénico	71
4.1.4.2.	Consumo de oxígeno comprimido	75
4.2.	Selección de la tecnología de celda de combustible a utilizar	79
4.2.1.	Comparación de celdas de combustible	80
4.2.2.	Elección de la tecnología de celda de combustible	81
4.3.	Inyección de hidrógeno en red de gas Hospital Regional de Concepción	82
4.3.1.	Redes de gas natural	82
4.3.2.	Tolerancias de inyección de hidrógeno en redes de gas sector distribución y servicios	83
4.3.3.	Volumen de inyección de hidrógeno en Hospital Regional de Concepción .	84
4.4.	Consideraciones de producción de oxígeno	85
4.5.	Selección del método de producción de hidrógeno verde	86
4.5.1.	Comparación de electrolizadores	88
4.5.2.	Elección de la tecnología del electrolizador	89
4.6.	Selección del método de almacenamiento	91
4.6.1.	Comparación métodos de almacenamiento	91
4.6.2.	Elección del método de almacenamiento	92
4.7.	Selección del método de transporte	93
4.8.	Selección de la fuente renovable y la ubicación de la planta	97
4.8.1.	Posibilidades de emplazamiento	101
4.8.2.	Análisis de recurso energético primario	102
4.8.2.1.	Perfiles verticales de velocidad del viento	102
4.8.2.2.	Ciclo diario anual de velocidad del viento	104
4.8.2.3.	Ciclo anual de velocidad del viento	105
4.8.2.4.	Direccionalidad del viento	106
4.8.3.	Generación energética	108
4.8.3.1.	Elección aerogenerador	108
4.8.3.2.	Ciclo diario anual de potencia de generación	109
4.8.3.3.	Ciclo anual de generación de energía	110
4.8.4.	Cercanía a la aplicación	113
4.8.5.	Disponibilidad de terreno	115

4.8.6.	Comparación de las ubicaciones posibles	120
4.8.7.	Elección de la ubicación de la planta	120
4.9.	Esquema conceptual de la planta de producción de hidrógeno verde	121
5.	Ingeniería básica de la planta de producción de hidrógeno verde	124
5.1.	Dimensionamiento de los equipos del uso final	124
5.1.1.	Disposición de equipos eléctricos	124
5.1.2.	Balace de masa generación eléctrica	138
5.1.3.	Inyección de hidrógeno a las redes de gas	144
5.2.	Dimensionamiento del sistema de transporte de hidrógeno y oxígeno para su uso final	152
5.2.1.	Diseño de estanques de almacenamiento camiones	156
5.2.1.1.	Estanque de almacenamiento agua camiones	156
5.2.1.2.	Estanque de almacenamiento hidrógeno camiones	157
5.2.1.3.	Estanque de almacenamiento oxígeno criogénico camiones	164
5.2.2.	Diseño contenedor de traslado cilindros oxígeno gaseoso	169
5.2.3.	Calculo de demanda de hidrógeno para transporte	171
5.3.	Dimensionamiento del proceso de producción de hidrógeno y oxígeno	181
5.3.1.	Disposición de equipos de producción de hidrógeno y oxígeno	181
5.3.2.	Balace de masa proceso de producción de hidrógeno y oxígeno	185
5.4.	Dimensionamiento del sistema de almacenamiento	199
5.4.1.	Sistema de almacenamiento agua planta electrolisis y Hospital Regional de Concepción	199
5.4.1.1.	Sistema de almacenamiento agua planta de electrolisis	200
5.4.1.2.	Sistema de almacenamiento agua celdas de combustible Hospital de Concepción	208
5.4.2.	Sistema de almacenamiento de hidrógeno planta de electrolisis y Hospital Regional de Concepción	211
5.4.2.1.	Sistema de almacenamiento hidrógeno planta de electrolisis	212
5.4.2.2.	Sistema de almacenamiento hidrógeno celdas de combustible Hospital Regional de Concepción	228
5.4.2.3.	Sistema de almacenamiento hidrógeno red de gas Hospital Regional de Concepción	232
5.4.3.	Sistema de almacenamiento de oxígeno gaseoso y criogénico	236
5.4.3.1.	Sistema de almacenamiento de oxígeno criogénico planta de electrolisis	238
5.4.3.2.	Sistema de almacenamiento de oxígeno gaseoso planta de electrolisis	250
5.4.3.3.	Estanques de almacenamiento oxígeno gaseoso y liquido	258
5.4.4.	Abastecimiento de energía eléctrica sistema de almacenamiento	265
6.	Evaluación Económica	276
6.1.	Determinación de costos de inversión Capex	276
6.1.1.	Costos de inversión generación eólica	278
6.1.2.	Costos de inversión electrolisis	278
6.1.3.	Costos de inversión almacenamiento	280
6.1.4.	Costos de inversión transporte	282
6.1.5.	Costos de inversión uso en celdas de combustible	285

6.1.6. Costos de inversión uso en red de gas	286
6.2. Determinación de costos fijos en la operación Opex	288
6.3. Determinación de costos variables en la operación Opex	294
6.4. Determinación de los costos de reemplazo de equipos Replex	294
6.5. Determinación de ingresos por venta de hidrógeno y oxígeno	295
6.6. Determinación de depreciaciones de equipos	297
6.7. Valor residual de los activos	297
6.8. Desarrollo y resultados del flujo de caja	299
6.9. Análisis de sensibilidad	301
7. Discusión	306
8. Conclusiones	308
Bibliografía	311
Anexos	317
Anexo A. Consumo histórico Hospital Regional de Concepción	317
A.1. Consumo eléctrico histórico	317
A.2. Consumo térmico histórico	320
A.3. Consumo oxígeno criogénico histórico	321
A.4. Consumo oxígeno gaseoso histórico	322
Anexo B. Criterios de cálculo espesor estanque de almacenamiento	324
B.1. Calculo de esfuerzos en un estanque cilíndrico	324
B.2. Criterio de Von Mises para un material isotropico	326
B.3. Criterio del espesor máximo para un material anisotrópico	327
Anexo C. Cálculo temperatura de salida compresores de los ciclos de compresión	329
C.1. Compresores hidrógeno gaseoso	329
C.2. Compresores oxígeno gaseoso	331
Anexo D. Masa real de oxígeno gaseoso y liquido mensual producida en régimen de operación estacionario	334
Anexo E. Desarrollo flujo de caja	348
E.1. Flujo de caja proyecto puro	348
E.2. Flujo de caja proyecto con deuda	356