

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance.....	2
Capítulo 2: Marco teórico.....	4
2.1. Concentración solar de potencia	4
2.1.1. Almacenamiento térmico.....	6
2.1.2. Costos.....	6
2.2. Energías renovables variables	7
2.2.1. Comportamiento dinámico inercia y convertidores	7
2.2.2. Estabilidad dinámica.....	9
2.2.3. Costos	11
2.3. Hidrógeno verde	11
2.4. Sistemas de almacenamiento	17
2.5. Sistema eléctrico	20
2.5.1. Antecedentes del sistema eléctrico nacional	20
2.5.2. Descarbonización	22
2.5.3. Planificación y operación del sistema	25
Capítulo 3: Metodología.....	28
3.1. Evaluación técnico-económica de las tecnologías	29
3.2. Modelo de optimización	29
3.2.1. Operación del sistema	29
3.2.2. Flujo por las líneas	40

3.2.3. Inversión en las tecnologías	41
3.3. Demanda del sistema.....	41
3.4. Curvas recurso solar y eólico	43
3.5. Red de prueba	46
3.6. Costos variables	48
3.7. Costos de inversión.....	51
3.8. Descarbonización.....	52
3.9. Capacidad instalada en el sistema.....	52
3.10. Casos de estudio	53
Capítulo 4: Resultados y análisis	55
4.1. Evaluación técnico-económica de las tecnologías	55
4.1.1. Concentración solar de potencia.....	55
4.1.2. Parque fotovoltaico con almacenamiento	56
4.1.3. Parque eólico con almacenamiento.....	58
4.1.4. Electrolizador.....	60
4.2. Casos de estudio	62
4.2.1. Caso 1: descarbonización a 2030 con generación renovable y sin impuesto a las emisiones	62
4.2.2. Caso 2: descarbonización a 2030 con generación renovable y con impuesto a las emisiones	76
4.2.3. Caso 3: descarbonización a 2030 con generación convencional (gas).....	87
Capítulo 5: Conclusiones.....	99
Capítulo 6: Trabajo Futuro	102
Capítulo 7: Bibliografía	103
Anexos	108
Anexo A. Casos de estudio	108

Anexo A.1. Caso 1: descarbonización a 2030 con generación renovable y sin impuesto a las emisiones	108
Anexo A.2. Caso 2: descarbonización a 2030 con generación renovable y con impuesto a las emisiones	115
Anexo A.3. Caso 3: descarbonización a 2030 con generación convencional (gas)	122
Anexo B. Congestionamiento en el sistema de transmisión de 500 kV del norte y sistema de transmisión HVDC	128
Anexo B.1. Caso 1: descarbonización a 2030 con generación renovable y sin impuesto a las emisiones	129
Anexo B.2. Caso 2: descarbonización a 2030 con generación renovable y con impuesto a las emisiones	130
Anexo B.3. Caso 3: descarbonización a 2030 con generación convencional (gas)	131

Índice de Tablas

TABLA 2.1: COSTOS DE INVERSIÓN CSP	7
TABLA 2.2: COSTOS DE INVERSIÓN SOLAR PV Y EÓLICA	11
TABLA 2.3: COSTOS DE INVERSIÓN SOLAR PV Y EÓLICA CONSIDERANDO ALMACENAMIENTO	11
TABLA 2.4: CUADRO COMPARATIVO DE ELECTROLIZADORES ALK Y PEM [26].	13
TABLA 2.5: IMPORTACIONES DE COMBUSTIBLES DURANTE 2021 [38].	22
TABLA 2.6: FACTORES DE EMISIÓN DE CO ₂	22
TABLA 2.7: RETIRO DE CENTRALES A CARBÓN PARA 2024 [42].	23
TABLA 3.1: VARIACIÓN DE DEMANDA SEGÚN LA FIJACIÓN DE PRECIOS DE CORTO PLAZO [47].	42
TABLA 3.2: SUBESTACIONES DE LA RED REDUCIDA	48
TABLA 3.3: PROYECCIÓN PRECIO CARBÓN TÉRMICO [47].	49
TABLA 3.4: PROYECCIÓN PRECIO GNL [47].	49
TABLA 3.5: PROYECCIÓN PRECIO CRUDO DE BRENT [47].	50
TABLA 3.6: CONSUMOS ESPECÍFICOS [47].	50
TABLA 3.7: COSTOS VARIABLES NO COMBUSTIBLES [16].	50
TABLA 3.8: COSTOS VARIABLES ESTIMADOS	51
TABLA 3.9: COSTOS VARIABLES ESTIMADOS CONSIDERANDO IMPUESTO A LAS EMISIONES.	51
TABLA 3.10: COSTOS DE INVERSIÓN ESTIMADOS.	52
TABLA 3.11: SALIDA DE CENTRALES QUE USAN CARBÓN A 2030	52
TABLA 3.12: CAPACIDAD INSTALADA DE OTRAS TECNOLOGÍAS	53
TABLA 4.1: COSTOS MARGINALES 2023 - CASO 1	71
TABLA 4.2: COSTOS MARGINALES 2027 - CASO 1	72
TABLA 4.3: COSTOS MARGINALES 2030 - CASO 1	72
TABLA 4.4: COSTOS MARGINALES 2040 - CASO 1	72
TABLA 4.5: COSTOS MARGINALES 2050 - CASO 1	72
TABLA 4.6: COSTOS DE OPERACIÓN - CASO 1	73
TABLA 4.7: INVERSIONES POR AÑO - CASO 1	74
TABLA 4.8: EMISIONES ANUALES - CASO 1	75

TABLA 4.9: SENSIBILIDAD COSTO DE INVERSIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA HÍBRIDA	75
TABLA 4.10: SENSIBILIDAD HORAS DE ALMACENAMIENTO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA HÍBRIDA	76
TABLA 4.11: COSTOS MARGINALES 2023 - CASO 2	85
TABLA 4.12: COSTOS MARGINALES 2027 - CASO 2	85
TABLA 4.13: COSTOS MARGINALES 2030 - CASO 2	85
TABLA 4.14: COSTOS MARGINALES 2040 - CASO 2	85
TABLA 4.15: COSTOS MARGINALES 2050 - CASO 2	86
TABLA 4.16: COSTOS DE OPERACIÓN - CASO 2	86
TABLA 4.17: INVERSIONES POR AÑO - CASO 2	87
TABLA 4.18: EMISIONES ANUALES - CASO 2	87
TABLA 4.19: COSTOS MARGINALES 2023 - CASO 3	96
TABLA 4.20: COSTOS MARGINALES 2027 - CASO 3	96
TABLA 4.21: COSTOS MARGINALES 2030 - CASO 3	96
TABLA 4.22: COSTOS MARGINALES 2040 - CASO 3	96
TABLA 4.23: COSTOS MARGINALES 2050 - CASO 3	97
TABLA 4.24: COSTO DE OPERACIÓN - CASO 3	97
TABLA 4.25: INVERSIONES POR AÑO - CASO 3	98
TABLA 4.26: EMISIONES ANUALES - CASO 3	98

Índice de Figuras

FIGURA 2.1: TECNOLOGÍAS CSP: (1) CILINDROS PARABÓLICOS; (2) PLATOS PARABÓLICOS; (3) TORRE RECEPTORA CENTRAL; (4) REFLECTORES LINEALES DE FRESNEL [8]	5
FIGURA 2.2: ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CSP [12].....	6
FIGURA 2.3: EJEMPLOS DE (A) CONVERTIDOR GRID-FORMING, (B) CONVERTIDOR GRID-FOLLOWING [21].	9
FIGURA 2.4: REQUERIMIENTO DE CAPACIDAD FAULT RIDE-THROUGH EN LA NORMATIVA CHILENA [22].	10
FIGURA 2.5: POTENCIAL DEL HIDRÓGENO VERDE EN LAS DISTINTAS INDUSTRIAS [28].	14
FIGURA 2.6: COSTO DE DESARROLLO DEL HIDRÓGENO VERDE [USD/KG H ₂] EN CHILE [28].	15
FIGURA 2.7: PROYECCIÓN DEL COSTO DE DESARROLLO DE H ₂ EN CHILE Y OTROS PAÍSES A 2030 [28].	15
FIGURA 2.8: ENERGÍA ALMACENADA EN EMBALSES [30].	16
FIGURA 2.9: PROCESO QUÍMICO DE ELECTRÓLISIS Y METANIZACIÓN [31].	16
FIGURA 2.10: ALTERNATIVAS PARA EL HIDRÓGENO EN EL SECTOR ELÉCTRICO [29].	17
FIGURA 2.11: SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.	18
FIGURA 2.12: SERVICIOS QUE PUEDEN PROVEER LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO [35].....	19
FIGURA 2.13: CAPACIDAD INSTALADA EN EL SEN EN 2021	21
FIGURA 2.14: GENERACIÓN ANUAL POR TECNOLOGÍA EN EL SEN 2021.....	21
FIGURA 2.15: GENERACIÓN DE PE LA FLOR Y PFV ANDES SOLAR EL DÍA 15/01/2022.....	24
FIGURA 2.16: PERSPECTIVA TEMPORAL DE LA TOMA DE DECISIONES [45].....	25
FIGURA 2.17: DESCARBONIZACIÓN SEGÚN ESCENARIOS DE LARGO PLAZO [46].....	27
FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR.	28
FIGURA 3.2: DEMANDA NETA ANUAL	42
FIGURA 3.3: DEMANDA MÁXIMA HORARIA ANUAL.....	43
FIGURA 3.4: CURVA DEL RECURSO EÓLICO AL NORTE DE LA S/E CHANGOS.....	44
FIGURA 3.5: CURVA DEL RECURSO EÓLICO AL SUR DE LA S/E CHANGOS.....	44
FIGURA 3.6: CURVA DEL RECURSO SOLAR EN EL NORTE DEL SISTEMA.....	45
FIGURA 3.7: CURVA DEL RECURSO SOLAR EN EL CENTRO DEL SISTEMA.....	45
FIGURA 3.8: CURVA DEL RECURSO SOLAR EN EL SUR DEL SISTEMA	46
FIGURA 3.9: RED REDUCIDA PELP.....	47
FIGURA 4.1: COSTO DE DESARROLLO CSP	55
FIGURA 4.2: ANÁLISIS FODA CSP	56
FIGURA 4.3: COSTO DE DESARROLLO FOTOVOLTAICA.....	57

FIGURA 4.4: COSTO DE DESARROLLO FOTOVOLTAICA HÍBRIDA	57
FIGURA 4.5: ANÁLISIS FODA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	58
FIGURA 4.6: COSTO DE DESARROLLO EÓLICA.....	59
FIGURA 4.7: COSTO DE DESARROLLO EÓLICA HÍBRIDA	59
FIGURA 4.8: ANÁLISIS FODA GENERACIÓN EÓLICA	60
FIGURA 4.9: COSTO DE DESARROLLO HIDRÓGENO VERDE.....	61
FIGURA 4.10: ANÁLISIS FODA HIDRÓGENO VERDE.....	61
FIGURA 4.11: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 1.....	63
FIGURA 4.12: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 1.....	63
FIGURA 4.13: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 1.....	64
FIGURA 4.14: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 1.....	64
FIGURA 4.15: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 1.....	65
FIGURA 4.16: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 1	66
FIGURA 4.17: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 1	66
FIGURA 4.18: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 1	67
FIGURA 4.19: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 1	67
FIGURA 4.20: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 1	68
FIGURA 4.21: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2023 - CASO 1	69
FIGURA 4.22: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2027 - CASO 1	69
FIGURA 4.23: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2030 - CASO 1	70
FIGURA 4.24: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2040 - CASO 1	70
FIGURA 4.25: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2050 - CASO 1	70
FIGURA 4.26: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 2.....	77
FIGURA 4.27: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 2.....	77
FIGURA 4.28: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 2.....	78
FIGURA 4.29: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 2.....	78
FIGURA 4.30: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 2.....	79
FIGURA 4.31: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 2	80
FIGURA 4.32: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 2	80
FIGURA 4.33: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 2	81
FIGURA 4.34: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 2	81
FIGURA 4.35: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 2	82
FIGURA 4.36: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2023 - CASO 2	83
FIGURA 4.37: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2027 - CASO 2	83
FIGURA 4.38: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2030 - CASO 2	83
FIGURA 4.39: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2040 - CASO 2	84
FIGURA 4.40: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2050 - CASO 2	84
FIGURA 4.41: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 3.....	88
FIGURA 4.42: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 3.....	89
FIGURA 4.43: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 3.....	89
FIGURA 4.44: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 3.....	90
FIGURA 4.45: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 3.....	90
FIGURA 4.46: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2023 - CASO 3	91
FIGURA 4.47: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2027 - CASO 3	91
FIGURA 4.48: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2030 - CASO 3	92
FIGURA 4.49: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2040 - CASO 3	92
FIGURA 4.50: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2050 - CASO 3	93
FIGURA 4.51: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2023 - CASO 3	94
FIGURA 4.52: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2027 - CASO 3	94
FIGURA 4.53: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2030 - CASO 3	94
FIGURA 4.54: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2040 - CASO 3	95
FIGURA 4.55: NUEVA CAPACIDAD INSTALADA 2050 - CASO 3	95

Índice de Anexos

ANEXO A.1.1: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 1	108
ANEXO A.1.2: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 1	108
ANEXO A.1.3: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2026 – CASO 1	109
ANEXO A.1.4: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 1	109
ANEXO A.1.5: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 1	110
ANEXO A.1.6: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 1	110
ANEXO A.1.7: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 1	111
ANEXO A.1.8: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 1	111
ANEXO A.1.9: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 1	112
ANEXO A.1.10: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2026 - CASO 1	112
ANEXO A.1.11: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 1	113
ANEXO A.1.12: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 1	113
ANEXO A.1.13: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 1	114
ANEXO A.1.14: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 1	114
ANEXO A.2.1: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 2	115
ANEXO A.2.2: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 2	115
ANEXO A.2.3: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2026 - CASO 2	116
ANEXO A.2.4: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 2	116
ANEXO A.2.5: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 2	117
ANEXO A.2.6: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 2	117
ANEXO A.2.7: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 2	118
ANEXO A.2.8: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 2	118
ANEXO A.2.9: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 2	119
ANEXO A.2.10: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2026 - CASO 2	119
ANEXO A.2.11: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 2	120
ANEXO A.2.12: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 2	120
ANEXO A.2.13: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 2	121
ANEXO A.2.14: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 2	121
ANEXO A.3.1: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 3	122
ANEXO A.3.2: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 3	122
ANEXO A.3.3: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2026 - CASO 3	123
ANEXO A.3.4: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 3	123
ANEXO A.3.5: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 3	124
ANEXO A.3.6: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 3	124
ANEXO A.3.7: GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 3	125
ANEXO A.3.8: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2024 - CASO 3	125
ANEXO A.3.9: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2025 - CASO 3	126
ANEXO A.3.10: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2026 - CASO 3	126
ANEXO A.3.11: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2028 - CASO 3	127
ANEXO A.3.12: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2029 - CASO 3	127
ANEXO A.3.13: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2035 - CASO 3	128
ANEXO A.3.14: GENERACIÓN PORCENTUAL POR TECNOLOGÍA 2045 - CASO 3	128
ANEXO B.1.1: NIVEL DE CONGESTIÓN 2023 - CASO 1	129
ANEXO B.1.2: NIVEL DE CONGESTIÓN 2028 - CASO 1	129
ANEXO B.1.3: NIVEL DE CONGESTIÓN 2030 - CASO 1	129
ANEXO B.1.4: NIVEL DE CONGESTIÓN 2050 - CASO 1	130
ANEXO B.2.1: NIVEL DE CONGESTIÓN 2023 - CASO 2	130
ANEXO B.2.2: NIVEL DE CONGESTIÓN 2028 - CASO 2	130
ANEXO B.2.3: NIVEL DE CONGESTIÓN 2030 - CASO 2	130
ANEXO B.2.4: NIVEL DE CONGESTIÓN 2050 - CASO 2	131
ANEXO B.3.1: NIVEL DE CONGESTIÓN 2023 - CASO 3	131
ANEXO B.3.2: NIVEL DE CONGESTIÓN 2028 - CASO 3	131
ANEXO B.3.3: NIVEL DE CONGESTIÓN 2030 - CASO 3	132

