

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.2.1.	Objetivo general	1
1.2.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Estructura.....	3
2.	Antecedentes.....	4
2.1.	Sistema eléctrico en Chile	4
2.1.1.	Proyección de Demanda	4
2.1.2.	Planificación energética.....	5
2.2.	Potencial de energías renovables no convencionales (ERNC) en Chile	6
2.2.1.	Potencial recurso eólico.....	6
2.2.2.	Potencial recurso solar	8
2.3.	Transmisión de Potencia.....	11
2.4.	Equipos FACTS.....	13
2.4.1.	Compensación en Serie	14
2.4.2.	Compensación en Paralelo	22
2.4.3.	Compensación Combinada.....	26
2.5.	Incorporación de dispositivos FACTS en el despacho económico	27
3.	Metodología.....	29
3.1.	Modelamiento matemático	29
3.1.1.	Resolución en dos etapas.....	31
3.1.2.	Restricciones de Unit Commitment.....	32
3.1.3.	Datos utilizados para la modelación.....	35
3.1.4.	Perfiles de hidrología.....	42
3.1.5.	Perfiles de disponibilidad de recursos solares y eólicos.....	44
3.1.6.	Fijación de equipos FACTS	46
4.	Resultados y Análisis	48
4.1.	Caso Base	48
4.2.	Expansión de la capacidad instalada de ERNC	56
4.2.1.	Expansión de capacidad solar.....	56
4.2.2.	Expansión de capacidad eólica.....	60

4.2.3. Expansión conjunta solar y eólica	63
4.3. Efecto de las restricciones en el uso de ERNC.....	66
5. Conclusiones y Trabajo futuro	68
5.1. Conclusiones del trabajo.....	68
5.2. Trabajo Futuro	69
6. Bibliografía.....	70
7. Anexos.....	72
7.1. Datos operacionales de las centrales	72
7.1.1. Centrales térmicas.....	72
7.1.2. Centrales hidráulicas de pasada.....	74
7.1.3. Centrales hidráulicas de embalse.....	76
7.1.4. Centrales de generación solar	76
7.1.5. Centrales de generación eólica	78
7.2. Ubicación equipos FACTS.....	78
7.3. Total de horas líneas saturadas	79
7.3.1. Caso base: Hidrología seca.....	79
7.3.2. Caso base: Hidrología media.....	79
7.3.3. Caso base: Hidrología húmeda.....	80
7.3.4. Expansión de capacidad solar 50%	80
7.3.5. Expansión de capacidad solar 100%	81
7.3.6. Expansión de capacidad eólica 50%.....	81
7.3.7. Expansión de capacidad eólica 100%.....	82
7.3.8. Expansión de capacidad ERNC 50%	82
7.4. Energía generada [MWh] por barra.....	83
7.4.1. Energía anual generada [MWh] caso base: Hidrología seca	83
7.4.2. Energía anual generada [MWh] caso base: Hidrología media	86
7.4.3. Energía anual generada [MWh] caso base: Hidrología húmeda	89
7.4.4. Energía anual generada [MWh] expansión capacidad solar 50%	92
7.4.5. Energía anual generada [MWh] expansión capacidad solar 100%	95
7.4.6. Energía anual generada [MWh] expansión capacidad eólica 50%.....	98
7.4.7. Energía anual generada [MWh] expansión capacidad eólica 100%.....	101
7.4.8. Energía anual generada [MWh] expansión capacidad ERNC 50%	104

Índice de tablas

Tabla 1: Previsión de demanda SIC-SING [GWh]. Fuente: CNE	5
Tabla 2: Costos y potencias generadas para distintos valores de reactancias	28
Tabla 3: Capacidad instalada por barra.	38
Tabla 4: Parámetros de líneas de transmisión modelo simplificado	40
Tabla 5: Costo total del sistema para el Caso Base.	48
Tabla 6: Líneas con equipos FACTS caso hidrología seca	48
Tabla 7: Energía anual generada [GWh] hidrología seca.	50
Tabla 8: Uso de ERNC hidrología seca.....	51
Tabla 9: Líneas con equipos FACTS caso hidrología media	51
Tabla 10: Energía anual generada [GWh] hidrología media.....	52
Tabla 11: Uso de ERNC hidrología media.....	53
Tabla 12: Líneas con equipos FACTS caso hidrología húmeda	53
Tabla 13: Energía anual generada [GWh] hidrología húmeda.....	54
Tabla 14: Uso de ERNC hidrología húmeda.....	54
Tabla 15: Costo anual del sistema para distintos escenarios de expansión de ERNC.....	56
Tabla 16: Líneas con equipos FACTS. Expansión solar 50%.....	56
Tabla 17: Energía anual generada [GWh] capacidad solar aumentada en un 50%	57
Tabla 18: Uso de ERNC capacidad solar aumentada en un 50%	58
Tabla 19: Líneas con equipos FACTS. Expansión solar 100%.....	58
Tabla 20: Energía anual generada [GWh] capacidad solar aumentada en un 100%	59
Tabla 21: Uso de ERNC capacidad solar aumentada en un 100%	60
Tabla 22: Líneas con equipos FACTS. Expansión eólica 50%.....	60
Tabla 23: Energía anual generada [GWh] capacidad eólica aumentada en un 50%	61
Tabla 24: Uso de ERNC capacidad eólica aumentada en un 50%	61
Tabla 25: Líneas con equipos FACTS. Expansión eólica 100%.....	62
Tabla 26: Energía anual generada [GWh] capacidad eólica aumentada en un 100%	63
Tabla 27: Uso de ERNC capacidad eólica aumentada en un 100%	63
Tabla 28: Líneas con equipos FACTS. Expansión ERNC 50%.....	63
Tabla 29: Energía anual generada [GWh] capacidad solar y eólica aumentada en un 50%	64
Tabla 30: Uso de ERNC capacidad solar y eólica aumentada en un 50%	65
Tabla 31: Costos operacionales casos de restricciones en capacidad solar aumentada 100%	66
Tabla 32: Uso de ERNC para casos de restricciones en capacidad solar aumentada 100%	67

Índice de figuras

Figura 1: Estimación del factor de planta anual de central eólica para el sistema sin restricciones (izquierda), con restricciones (centro) y con factor de planta mayor 0,3 (derecha). Fuente: [17].	7
Figura 2: Estimación del factor de planta anual PV fijo para el sistema sin restricciones (izquierda), con restricciones (centro) y con factor de planta mayor 0,3 (derecha). Fuente [17].	9
Figura 3: Estimación del factor de planta anual PV con seguimiento para el sistema sin restricciones (izquierda), con restricciones (centro) y con factor de planta mayor 0,3 (derecha). Fuente [17].	10
Figura 4: Sistema de Potencia de dos barras	11
Figura 5: Potencia Activa y Reactiva transmitida en función de la diferencia angular	12
Figura 6: Efecto de la compensación sobre el modelo de flujo de potencia AC	13
Figura 7: Compensación en serie ideal. Fuente: [2]	15
Figura 8: Elemento básico de un TSSC	16
Figura 9: Compensación en Serie Conmutada por Tiristores (TSSC). Fuente: [2]	16
Figura 10: Potencia activa transmitida distintos valores de compensación	17
Figura 11: Capacitor en Serie controlado por Tiristores (TCSC). Fuente: [2]	17
Figura 12: Capacitor en Serie Controlado por Conmutación Forzada. Fuente [2]	18
Figura 13: Compensador de Reactivos Serie Estático. Fuente [2]	19
Figura 14: Compensador en Serie Sincrónico Estático. Fuente: [2]	20
Figura 15: Compensación por ángulo de fase. Fuente [2]	21
Figura 16: Potencia transmitida en función del ángulo de fase con compensador de ángulo	22
Figura 17: Compensación en paralelo ideal. Fuente: [2]	22
Figura 18: a) TCR; b) TSC. Fuente: [2]	23
Figura 19: a) Compensador Estático de Reactivos (SVC); b) Sistema con SVC. Fuente: [2]	24
Figura 20: Potencia activa versus ángulo de fase con SVC	25
Figura 21: STATCOM. Fuente: [2]	26
Figura 22: Estructura del UPFC. Fuente [2]	27
Figura 23: Sistema de 3 nodos	28
Figura 24: Sistema eléctrico chileno simplificado.	36
Figura 25: Curva de duración año 2025.	37
Figura 26: Distribución de demanda por barra año 2025.	38
Figura 27: Capacidad instalada por zona.	39
Figura 28: Capacidad instalada por tecnología.	39
Figura 29: Curva de oferta o lista de mérito de centrales térmicas.	40
Figura 30: Hidrología seca (2007).	42
Figura 31: Hidrología media (1973).	43
Figura 32: Hidrología húmeda (1969).	44
Figura 33: Disponibilidad del recurso SING	45
Figura 34: Disponibilidad del recurso SIC-Norte	45
Figura 35: Disponibilidad del recurso SIC-Centro	45
Figura 36: Disponibilidad del recurso SIC-Sur	46
Figura 37: Diagrama de flujo de metodología utilizada	47
Figura 38: Cantidad de horas de líneas saturadas. Hidrología Seca.	49
Figura 39: Cantidad de horas de líneas saturadas. Hidrología Media.	52
Figura 40: Cantidad de horas de líneas saturadas. Hidrología húmeda.	53
Figura 41: Cantidad de horas de líneas saturadas. Capacidad solar aumentada en 50%	57

Figura 42: Cantidad de horas de líneas saturadas. Capacidad solar aumentada 100%.	59
Figura 43: Cantidad de horas de líneas saturadas. Capacidad eólica aumentada en 50%.	61
Figura 44: Cantidad de horas de líneas saturadas. Capacidad eólica aumentada en 100%.	62
Figura 45: Cantidad de horas de líneas saturadas. Aumento generación ERNC 50%.	64