

Tabla de Contenidos

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Alcances	2
1.3.	Objetivos generales	2
1.4.	Objetivos específicos.....	3
1.5.	Estructura general.....	3
2.	Estado del arte	4
2.1.	Contexto mundial	4
2.2.	ERNC en el mundo	7
2.3.	ERNC en Chile.....	10
2.4.	Variabilidad en las ERNC	14
2.5.	Ciclaje	18
2.6.	Ciclaje en el mundo.....	21
2.7.	Ciclaje en Chile	23
2.8.	Sistema eléctrico chileno.....	24
2.8.1.	SIC.....	26
2.8.2.	SING	27
3.	Metodología	28
3.1.	Descripción general.....	28
3.2.	Estudios a realizar	33
3.2.1.	Partidas	33
3.2.2.	Horas de operación.....	34
3.2.3.	Razón de ciclaje	34
3.2.4.	Seguimientos de carga.....	34
3.2.5.	HEO.....	35
3.2.6.	CVNC.....	36
3.2.7.	Costos asociados a mantenimientos	36
3.2.8.	Δ CVNC por cada 100 MW de energía solar FV	36

3.2.9.	Costos de mantenimientos por cada 100 MW de energía solar FV.....	36
3.3.	Validación metodológica.....	37
4.	Descripción estudio.....	38
4.1.	Grupos de estudio.....	38
4.1.1.	Unidades de carbón.....	38
4.1.2.	Unidades de ciclo combinado.....	39
4.2.	Grupos de escenarios.....	40
4.3.	Consideraciones.....	43
5.	Caso de estudio y discusión.....	45
5.1.	Unidades de carbón.....	45
5.1.1.	Partidas.....	45
5.1.2.	Horas de operación.....	47
5.2.	Unidades de ciclo combinado.....	50
5.2.1.	Partidas.....	50
5.2.1.1.	Escenarios pre interconexión.....	51
5.2.1.2.	Escenarios post interconexión.....	52
5.2.1.3.	Escenarios interconexión.....	52
5.2.1.4.	Escenarios solares.....	53
5.2.2.	Horas de operación.....	53
5.2.2.1.	Escenarios pre interconexión.....	56
5.2.2.2.	Escenarios post interconexión.....	56
5.2.2.3.	Escenarios interconexión.....	57
5.2.2.4.	Escenarios solares.....	57
5.2.3.	Razón de ciclaje.....	57
5.2.3.1.	Escenarios pre interconexión.....	58
5.2.3.2.	Escenarios post interconexión.....	58
5.2.3.3.	Escenarios interconexión.....	58
5.2.3.4.	Escenarios solares.....	58
5.2.4.	Seguimientos de carga.....	59
5.2.4.1.	Escenarios pre interconexión.....	60
5.2.4.2.	Escenarios post interconexión.....	60
5.2.4.3.	Escenarios interconexión.....	61

5.2.4.4.	Escenarios solares	61
5.2.5.	HEO.....	61
5.2.5.1.	Escenarios pre interconexión.....	62
5.2.5.2.	Escenarios post interconexión.....	62
5.2.5.3.	Escenarios interconexión.....	63
5.2.5.4.	Escenarios solares	63
5.2.6.	CVNC.....	63
5.2.6.1.	Escenarios pre interconexión.....	64
5.2.6.2.	Escenarios post interconexión.....	65
5.2.6.3.	Escenarios interconexión.....	65
5.2.6.4.	Escenarios solares	65
5.2.7.	Δ CVNC por cada 100 MW FV	65
5.2.7.1.	Sensibilidad respecto al N° de partidas	66
5.2.7.2.	Sensibilidad respecto a horas de operación.....	67
5.2.7.3.	Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.....	68
5.2.8.	Costos de mantenimientos por cada 100 MW FV.....	69
5.2.8.1.	Sensibilidad respecto al N° de partidas	69
5.2.8.2.	Sensibilidad respecto a horas de operación.....	70
5.2.8.3.	Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.....	71
6.	Conclusiones y trabajo futuro	73
6.1.	Conclusiones	73
6.2.	Trabajo futuro.....	75
	Bibliografía	76

Índice de Figuras

Figura 2.1: PIB per cápita vs Consumo energético per cápita. Elaboración propia, fuente: Banco mundial [2].	5
Figura 2.2: Consumo energético mundial 1985 - 2013 [TWh]. Elaboración propia, fuente: Base de datos BP [3].	6
Figura 2.3: Consumo energético mundial por tecnología de procedencia 2013. Elaboración propia, fuente: Base de datos BP [3].	6
Figura 2.4: Emisiones globales de CO2 (Sector eléctrico). Elaboración propia, fuente: Base de datos BP [3].	7
Figura 2.5: Capacidad instalada en el mundo E. Solar y E. Eólica 2000-2013. Elaboración propia, fuente: Base de datos BP [3].	9
Figura 2.6: influencia de E. Solar FV y E. Eólica en consumo de ERNC por fuente primaria de producción. Elaboración propia, fuente: Base de datos BP [3].	9
Figura 2.7: Participación ERNC por tecnología sistema eléctrico chileno (31/12/2014). Elaboración propia, fuente: CER [9].	12
Figura 2.8: Estado de proyectos ERNC, sistema eléctrico chileno a 31/12/2014. Elaboración propia, fuente: CER [9].	13
Figura 2.9: Operación real central eólica El Arrayán. Elaboración propia, fuente: CDEC-SIC [11].	15
Figura 2.10: Operación real central eólica El Arrayán. Elaboración propia, fuente: CDEC-SIC [11].	16
Figura 2.11: Seguimiento de carga, encendido en caliente, tibio y frío. Elaboración propia, fuente: Intertek [13].	19
Figura 2.12: Contraste entre parámetro EHS y visión de GE para análisis de efecto de ciclaje y recomendaciones de inspección de las unidades. Fuente: GE [15].	21
Figura 2.13: Composición del sector eléctrico chileno. Fuente: Systep [22].	25
Figura 2.14: Energía mensual generada en el SIC por tecnología. Fuente: Reporte SYSTEP Operación del SIC (Marzo 2015) [24].	26
Figura 2.15: Energía mensual generada en el SING por tecnología. Fuente: Reporte SYSTEP Operación del SING (Marzo 2015) [25].	27
Figura 3.1: Esquemático metodología utilizada.	28
Figura 3.2: Metodología simulaciones AMEBA.	30
Figura 3.3: Esquemático fenómeno a analizar por grupo de escenarios.	33
Figura 5.1: N° de partidas totales grupo unidades de carbón.	46
Figura 5.2: Horas de operación totales grupo unidades de carbón.	49
Figura 5.3: N° partidas por escenario, grupo de unidades de ciclo combinado.	51
Figura 5.4: Horas de operación totales grupo unidades de ciclo combinado.	56
Figura 5.5: Razón de ciclaje grupo unidades de ciclo combinado.	57
Figura 5.6: Seguimientos de carga grupo unidades de ciclo combinado.	60
Figura 5.7: Resultados HEO.	61
Figura 5.8: Resultados HEO escenarios solares.	62
Figura 5.9: Resultados CVNC.	64
Figura 5.10: Resultados CVNC escenarios solares.	64

Figura 5.11: Aumento en CVNC por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto al número de partidas.....	66
Figura 5.12: Aumento en CVNC por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto a horas de operación.	67
Figura 5.13: Aumento en CVNC por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.	68
Figura 5.14: Δ CM por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto al número de partidas.	69
Figura 5.15: Δ CM por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto a horas de operación.....	70
Figura 5.16: Δ CM por cada 100 MW de energía solar FV inyectados por sobre E4 (CNE 2025). Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.....	71

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Porcentaje de obligación por año según Ley 20.257. Fuente: Ley 20.257 [7].....	10
Tabla 2.2: Porcentaje de obligación por año según Ley 20.698. Fuente: Ley 20.698 [8].....	11
Tabla 2.3: Estado proyectos ERNC sistema eléctrico chileno al 31/12/2014. Fuente: CER [9].....	13
Tabla 2.4: Composición sector eléctrico chileno. Fuente: [5].....	25
Tabla 3.1: Resumen % de participación ERNC por escenario.....	32
Tabla 3.2: Casos sensibilidad HEO respecto al número de partidas.....	35
Tabla 3.3: Casos sensibilidad HEO respecto a horas de operación.....	35
Tabla 3.4: Casos sensibilidad HEO respecto a seguimientos de carga.....	35
Tabla 4.1: Detalle unidades consideradas en el grupo de unidades de carbón.....	38
Tabla 4.2: Detalle unidades consideradas en el grupo de unidades de ciclo combinado.....	39
Tabla 4.3: Unidades de ciclo combinado consideradas en escenarios pre interconexión (E1, E2 y E3).....	40
Tabla 4.4: Unidades de ciclo combinado consideradas en escenarios pre interconexión (solo E2 y E3).....	41
Tabla 4.5: Unidades de ciclo combinado consideradas en escenarios post interconexión.....	41
Tabla 4.6: Unidades de ciclo combinado consideradas en escenarios interconexión.....	42
Tabla 4.7: Unidades de ciclo combinado consideradas en escenarios solares.....	42
Tabla 4.8: Unidades consideradas para cada escenario en el cálculo de seguimientos de carga.....	43
Tabla 5.1: N° Partidas globales unidades de carbón.....	45
Tabla 5.2: Horas de operación por unidad, escenarios 1 - 7.....	47
Tabla 5.3: Horas de operación por unidad, escenarios 8 – 10.....	48
Tabla 5.4: N° Partidas globales unidades de ciclo combinado.....	50
Tabla 5.5: Horas de operación generales unidades de ciclo combinado, escenarios 1 – 7.....	53
Tabla 5.6: Horas de operación generales unidades de ciclo combinado, escenarios 8 - 10.....	54
Tabla 5.7: Detalle seguimientos de carga por escenario.....	59
Tabla 5.8: Sobrecosto operacional por cada 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto al N° de partidas.....	66
Tabla 5.9: Sobrecosto operacional por cada 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto a horas de operación.....	67
Tabla 5.10: Sobrecosto operacional por cada 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.....	68
Tabla 5.11: Δ CM / 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto al N° de partidas.....	69
Tabla 5.12: Δ CM por cada 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto a horas de operación... ..	70
Tabla 5.13: Δ CM por cada 100 MW FV por casos. Sensibilidad respecto a seguimientos de carga.....	71

Acrónimos

ERNC	Energías Renovables No Convencionales
FV	Fotovoltaica
CVNC	Costos variables no combustibles
SIC	Sistema Interconectado Central
SING	Sistema Interconectado del Norte Grande
PIB	Producto Interno Bruto
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> o Concentración solar de potencia.
RCA	Resolución de calidad ambiental
EOH	<i>Equivalent Operation Hours</i>
HEO	Horas Equivalentes de Operación
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
CDEC-SING	Centro de Despacho Económico de Carga – Sistema Interconectado del Norte Grande
CDEC-SIC	Centro de Despacho Económico de Carga – Sistema Interconectado Central
CNE	Comisión Nacional de Energía
CE-FCFM	Centro de Energía – Facultad de ciencias físicas y matemáticas