

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Justificación y motivación de la presente tesis	1
1.2. Objetivo general	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Alcances	2
1.5. Estructura del documento	3
2. Antecedentes generales	5
2.1. Panorama mundial de las energías renovables	5
2.2. Panorama nacional de las energías renovables	6
2.3. Modelos de planificación y operación en sistemas eléctricos de potencia	13
2.3.1. Predespacho económico	14
2.3.2. Planificación de la expansión en generación	15
2.4. Impactos de una alta penetración de energías renovables en el sistema eléctrico	16
2.5. Sistemas eléctricos en el mundo con penetraciones de energía renovable en torno al 100 %	18
3. Metodología	19
3.1. Nomenclatura	19
3.1.1. Tecnologías de generación	19
3.1.2. Conjuntos	20
3.1.3. Parámetros	20
3.1.4. Variables de decisión	21
3.2. Modelo de optimización	22
3.2.1. Función objetivo	22
3.2.2. Restricciones de operación	23
3.2.3. Central solar CSP	25
3.2.4. Centrales hidráulicas de embalse y bombeo	26
3.2.5. Baterías electroquímicas	27
3.2.6. Restricciones de seguridad de suministro	28
4. Caso de estudio: Sistema Eléctrico Nacional	33
4.1. Consideraciones generales	34
4.1.1. Datos de entrada	34
4.1.2. Condiciones de borde	41
4.2. Escenarios implementados	42

4.2.1.	Escenario base	42
4.2.2.	Portafolio óptimo bajo un criterio heurístico de reserva secundaria	42
4.2.3.	Portafolio óptimo para distintos niveles de penetración de TGV	43
4.2.4.	Portafolio óptimo en el que las ecuaciones inerciales son omitidas	43
4.2.5.	Portafolio óptimo considerando distintos niveles de gestión de demanda (DSM)	43
4.2.6.	Variantes implementadas a partir del escenario base	43
5.	Resultados y discusión	45
5.1.	Portafolio óptimo para distintos criterios de reserva secundaria	46
5.1.1.	Análisis de la confiabilidad en la operación del escenario base durante año seco	52
5.2.	Inversión y operación bajo distintos niveles de penetración de TGV	57
5.2.1.	Operación detallada semana 24 del año 2052 en base al criterio estocástico de reserva secundaria	61
5.2.2.	Operación detallada semana 24 del año 2052 en base al criterio heurístico de reserva secundaria	63
5.3.	Respuesta inercial del sistema	66
5.4.	Diferentes niveles de gestión de demanda (DSM)	69
5.5.	Variantes implementadas a partir el escenario base	71
5.5.1.	Inversión y operación sin tecnologías de almacenamiento electroquímico/hidrobombeo	71
5.5.2.	Inversión y operación en base a las tecnologías eólica, solar FV y hidráulicas	72
5.5.3.	Inversión y operación bajo una disminución agresiva en los costos de inversión de las TGV	73
5.6.	Algunas consideraciones económicas	75
6.	Conclusiones	77
6.1.	Trabajo futuro	79
	Bibliografía	81
A.	Anexos	85
A.1.	Valores asignados a cada parámetro	85
A.2.	Restricciones que aseguran disponibilidad energética de una hora a otra	86
A.2.1.	Baterías electroquímicas	86
A.2.2.	Hidráulica de bombeo	86
A.2.3.	Hidráulica de embalse	87
A.2.4.	Solar CSP	87
A.3.	Restricción no lineal asociada a la reserva secundaria	87
A.4.	Operación detallada del día representativo de cada mes en el contexto del escenario base para los años húmedo y seco	90

Índice de Tablas

2.1.	Potencia total instalada a 2015 correspondiente a las 6 tecnologías (en base a energías renovables) con más impacto en la matriz energética mundial. . . .	6
2.2.	Generación bruta mensual asociada a cada tecnología en base a recursos renovables no convencionales en Chile. Primer semestre 2016.	7
2.3.	Cuadro comparativo que entrega el porcentaje de utilización del recurso renovable en base a su potencial estimado.	10
2.4.	Requerimientos sistémicos propios de un sistema eléctrico termoelectrico tradicional.	14
2.5.	Lugares donde se ha suplido la demanda en base a un porcentaje de ERNC cercano o igual al 100 %.	18
4.1.	Potencias mínimas y máximas de cada central disponible para invertir. . . .	38
4.2.	Costo de inversión para cada tecnología.	39
4.3.	Costos variables asociados a la operación de cada tecnología.	39
4.4.	Años hidrológicos considerados en esta investigación.	41
5.1.	Capacidades óptimas a instalar de cada tecnología en el contexto del escenario base. Criterios de naturaleza estocástica y heurística para la reserva secundaria. 46	46
5.2.	Costos totales y costos de la energía bajo los dos criterios de reserva secundaria. 46	46
5.3.	Requerimientos de reserva secundaria bajo los dos criterios estudiados. . . .	47
5.4.	Asignación de reserva secundaria para cada tecnología.	47
5.5.	Energía generada por cada tecnología bajo ambos criterios de reserva secundaria. 48	48
5.6.	Participaciones de cada tecnología, en términos energéticos, al año 2016 y proyección al año 2051.	48
5.7.	Evolución de la capacidad instalada de cada tecnología bajo distintas penetraciones de TGV, a partir del escenario base.	57
5.8.	Evolución de la capacidad instalada de cada tecnología bajo distintas penetraciones de TGV, a partir del escenario base con criterio heurístico de reserva secundaria.	58
5.9.	Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Criterio estocástico de la reserva.	59
5.10.	Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Criterio heurístico de la reserva.	59
5.11.	Costo total, costo de la energía y cociente entre capacidad instalada y demanda máxima. Escenarios S_1 y S_2	66

5.12. Capacidades óptimas a instalar de cada tecnología considerando tres niveles distintos (en términos del porcentaje de la demanda) de gestión de demanda.	69
5.13. Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Se incluyen las reservas asignadas a cada tecnología para los tres escenarios estudiados en el contexto de DSM.	70
5.14. Capacidades óptimas a instalar de cada tecnología bajo un escenario sin baterías ni centrales de bombeo. Se incluye el resultado asociado al escenario base para facilitar la comparación entre los datos.	71
5.15. Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Escenario sin baterías ni centrales de bombeo.	72
5.16. Capacidades óptimas a instalar de cada tecnología bajo un escenario en base a viento, sol (FV) y agua. Se incluye el resultado asociado al escenario base para facilitar la comparación entre los datos.	73
5.17. Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Escenario en base a viento, sol (FV) y agua.	73
5.18. Capacidades óptimas a instalar de cada tecnología bajo un escenario donde el costo de inversión de las TGV disminuye considerablemente. Se incluye el resultado asociado al escenario base para facilitar la comparación entre los datos.	74
5.19. Requerimientos promedio de reserva primaria y secundaria. Escenario donde el costo de inversión de las TGV disminuye considerablemente.	74
5.20. Costo total y costo de la energía para el escenario base bajo los dos criterios de reserva secundaria estudiados.	75
5.21. Costo total y costo de la energía para aquellos escenarios donde se ha impuesto una penetración fija de TGV, bajo ambos criterios de reserva secundaria. . .	75
5.22. Costo total y costo de la energía para aquel escenario donde se han omitido las ecuaciones inerciales.	75
5.23. Costo total y costo de la energía para aquellos escenarios donde se han fijado distintos niveles de gestión de demanda.	75
5.24. Costo total y costo de la energía para los escenarios S , S' y S''	76
A.1. Valores asignados a las capacidades mínima y máxima (potencial) de cada tecnología, constantes de inercia, rampas horarias, rampas de emergencia y cotas para el nivel de agua almacenado en los embalses.	85
A.2. Valores asignados a múltiples parámetros utilizados en el presente trabajo. .	86

Índice de Ilustraciones

2.1.	Gráficos que muestran (a) la participación (en términos de capacidad en generación) de las ERNC en Chile y (b) los porcentajes de la capacidad en generación asociados a cada tecnología no convencional.	7
2.2.	Gráficos comparativos entre (a) la energía proveniente de fuentes ERNC y convencionales, y (b) la energía proveniente de cada una de las fuentes ERNC.	8
2.3.	Potencial regional de recursos renovables en Chile.	9
2.4.	Distribución del potencial en generación asociado a la tecnología geotérmica en Chile.	10
2.5.	Evolución histórica de las normativas de fomento a las ERNC en Chile	11
2.6.	Principales metas de Energía 2050.	12
2.7.	Modelos de planificación y operación de los sistemas eléctricos de potencia, en función de la complejidad y escala de tiempo considerada.	13
2.8.	Diagrama que representa el concepto de predespacho agrupado.	15
3.1.	Diagrama de flujos de potencia que representa la operación de la central solar CSP utilizada en este estudio. SP_j corresponde a la máxima energía termal que el receptor central puede absorber en la hora j	25
3.2.	Diagrama de flujos de potencia que representa la operación de la batería electroquímica utilizada en este estudio.	28
3.3.	Gráfico que ilustra la evolución temporal, post contingencia, de la frecuencia sistémica y $P_1 (= P_m - P_e)$	30
3.4.	Magnitud de la variable $\delta_{i,j}$ para todo el dominio de la misma.	31
4.1.	Primera semana del perfil de demanda utilizado en esta tesis.	34
4.2.	Proyecciones de demanda generadas en [1].	35
4.3.	Gráficos que muestran (a) la radiación en por unidad para las 8760 horas del año y (b) la radiación correspondiente a la primera semana de enero (curva azul) y primera semana de junio (curva roja).	36
4.4.	Distribución geográfica de las opciones de inversión en centrales eólica.	37
4.5.	Serie hidrológica generada a partir de un conjunto de tres años representativos de una hidrológica seca, media y húmeda.	41
5.1.	Despacho horario del día 24 de febrero de 2051. Escenario base.	49
5.2.	Despacho horario del día 6 de junio de 2051. Escenario base.	49
5.3.	Factores de planta de cada tecnología de generación implementada, para los dos días de estudio.	50

5.4. Gráficos que muestran las reservas (a) primaria y (b) secundaria asignadas por el coordinador. 24 de febrero de 2051.	50
5.5. Gráficos que muestran las reservas (a) primaria y (b) secundaria asignadas por el coordinador. 6 de junio de 2051.	51
5.6. Evolución del factor de planta mensual asociado a las tecnologías solar CSP y hidráulica de embalse.	51
5.7. Porcentaje de participación mensual de cada tecnología en el despacho de energía durante el año (a) húmedo y (b) seco.	52
5.8. Porcentaje de participación mensual de cada tecnología en el despacho de reserva secundaria durante el año (a) húmedo y (b) seco.	53
5.9. Evolución del nivel de agua almacenado en los embalses durante la serie de 3 años estudiada.	54
5.10. Despacho horario del día 29 de marzo de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	54
5.11. Asignación de reserva secundaria del día 29 de marzo de (a) 2050 y (b) 2052.	55
5.12. Despacho horario del día 22 de agosto de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	55
5.13. Asignación de reserva secundaria del día 22 de agosto de (a) 2050 y (b) 2052.	55
5.14. Despacho horario del día 16 de diciembre de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	56
5.15. Asignación de reserva secundaria del día 16 de diciembre de (a) 2050 y (b) 2052.	56
5.16. Gráficos que ilustran la capacidad instalada de cada tecnología bajo distintas penetraciones de TGV a partir de: (a) Escenario base y (b) escenario base con criterio heurístico de reserva secundaria.	57
5.17. Requerimiento de reserva secundaria bajo distintas penetraciones de TGV para (a) criterio estocástico y (b) heurístico de reserva secundaria.	59
5.18. Despacho horario escenario $\psi = 0, 25$. Criterio estocástico de reserva secundaria.	61
5.19. Asignación de reserva secundaria escenario $\psi = 0, 25$. Criterio estocástico. . .	61
5.20. Evolución de las ecuaciones (a) RoCoF y (b) Frecuencia Nadir durante la operación del escenario con penetración de TGV $\psi = 0, 25$. Criterio estocástico.	61
5.21. Despacho horario escenario $\psi = 0, 35$. Criterio estocástico de reserva secundaria.	62
5.22. Asignación de reserva secundaria escenario $\psi = 0, 35$. Criterio estocástico. . .	62
5.23. Evolución de las ecuaciones (a) RoCoF y (b) Frecuencia Nadir durante la operación del escenario con penetración de TGV $\psi = 0, 35$. Criterio estocástico.	62
5.24. Despacho horario escenario base con criterio heurístico de reserva secundaria.	63
5.25. Asignación de reserva secundaria escenario base con criterio heurístico. . . .	63
5.26. Evolución de las ecuaciones (a) RoCoF y (b) Frecuencia Nadir durante la operación del escenario base con criterio heurístico de reserva secundaria. . .	63
5.27. Despacho horario escenario $\psi = 0, 25$. Criterio heurístico de reserva secundaria.	64
5.28. Asignación de reserva secundaria escenario $\psi = 0, 25$. Criterio heurístico. . .	64
5.29. Evolución de las ecuaciones (a) RoCoF y (b) Frecuencia Nadir durante la operación del escenario con penetración de TGV $\psi = 0, 25$. Criterio heurístico.	64
5.30. Despacho horario asociado al escenario $\psi = 0, 35$. Criterio heurístico de reserva secundaria.	65
5.31. Asignación de reserva secundaria escenario $\psi = 0, 35$. Criterio heurístico. . .	65
5.32. Evolución de las ecuaciones (a) RoCoF y (b) Frecuencia Nadir durante la operación del escenario con penetración de TGV $\psi = 0, 35$. Criterio heurístico.	65
5.33. Gráficos que ilustran (a) ambos lados de la ecuación que limita el RoCoF máximo y (b) ambos lados de la ecuación que limita la reserva primaria desplegable. Escenario S_1 durante las 744 horas de enero.	67

5.34. Gráficos que ilustran (a) ambos lados de la ecuación que limita el RoCoF máximo y (b) ambos lados de la ecuación que limita la reserva primaria desplegable. Escenario S_2 durante las 744 horas de enero.	67
5.35. Asignación de reserva primaria para cada tecnología que debe prestar este servicio. Escenarios S_1 y S_2	68
A.1. Superficies generadas a partir de las tres expresiones en (A.2).	88
A.2. Curvas generadas a partir de las tres expresiones en (A.2).	89
A.3. Despacho horario del día 16 de enero de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	90
A.4. Asignación de reserva secundaria del día 16 de enero de (a) 2050 y (b) 2052.	90
A.5. Despacho horario del día 21 de febrero de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	91
A.6. Asignación de reserva secundaria del día 21 de febrero de (a) 2050 y (b) 2052.	91
A.7. Despacho horario del día 4 de abril de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base. .	92
A.8. Asignación de reserva secundaria del día 4 de abril de (a) 2050 y (b) 2052. .	92
A.9. Despacho horario del día 30 de mayo de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	93
A.10. Asignación de reserva secundaria del día 30 de mayo de (a) 2050 y (b) 2052.	93
A.11. Despacho horario del día 16 de junio de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	94
A.12. Asignación de reserva secundaria del día 16 de junio de (a) 2050 y (b) 2052.	94
A.13. Despacho horario del día 31 de julio de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base. .	95
A.14. Asignación de reserva secundaria del día 31 de julio de (a) 2050 y (b) 2052. .	95
A.15. Despacho horario del día 25 de septiembre de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	96
A.16. Asignación de reserva secundaria del día 25 de septiembre de (a) 2050 y (b) 2052.	96
A.17. Despacho horario del día 24 de octubre de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	97
A.18. Asignación de reserva secundaria del día 24 de octubre de (a) 2050 y (b) 2052.	97
A.19. Despacho horario del día 24 de noviembre de (a) 2050 y (b) 2052. Escenario base.	98
A.20. Asignación de reserva secundaria del día 24 de noviembre de (a) 2050 y (b) 2052.	98