

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Hipótesis	2
1.3	Objetivos y alcances	2
1.3.1	Objetivo general	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.3.3	Alcances.....	3
1.4	Estructura del documento	3
2.	Marco teórico.....	4
2.1	Optimización.....	4
2.1.1	Optimización con restricciones	4
2.1.2	Programación lineal.....	5
2.2	Planificación de sistemas eléctricos.....	7
2.2.1	Modelo teórico.....	8
2.3	Sistemas de almacenamiento	11
2.3.1	Descripción de los sistemas de almacenamiento.....	11
2.3.2	Tecnologías de almacenamiento.....	11
2.4	Modelamiento de sistemas eléctricos con almacenamiento.....	13
2.4.1	Modelo numérico detallado de operación	13
2.4.2	Modelo numérico detallado de planificación	14
2.4.3	Modelo teórico.....	14
3.	Metodología propuesta	20
3.1	Propuesta general.....	20
3.2	Supuestos fundamentales.....	25
3.3	Metodología simplificada	26

3.3.1	Construir LDC residual	30
3.3.2	Caso Base con convencionales.....	31
3.3.3	Dibujo de Screening Curves para ESS y Selección de tecnologías candidatas.....	32
3.3.4	Configuración de carga-descarga óptima	33
3.3.5	Costo de incorporación.....	39
3.3.6	Capacidad por construir.....	39
3.3.7	Nueva iteración.....	40
4.	Validación y casos de estudio.....	41
4.1	Introducción.....	41
4.2	Caso de estudio teórico.....	42
4.2.1	Inicialización del algoritmo	44
4.2.2	Primera iteración.....	45
4.2.3	Segunda iteración	53
4.2.4	Tercera iteración.....	61
4.2.5	Cuarta iteración.....	69
4.2.6	Quinta iteración y criterio de detención	75
4.2.7	Resumen del resultado.....	79
4.3	Sistema Eléctrico Nacional 2050.....	79
4.4	Caso de estudio sistema alemán 2050.....	85
4.5	Análisis de resultados	86
4.5.1	Caso Teórico.....	86
4.5.2	Sistema Eléctrico Nacional.....	88
4.5.3	Sistema Alemán.....	93
4.5.4	Conceptos generales	96
5.	Conclusiones y trabajo futuro.....	97
5.1	Conclusiones.....	97

5.2	Perspectivas de aplicaciones	98
5.3	Trabajo futuro	98
6.	Bibliografía.....	100
7.	Apéndice.....	104
7.1	Deducción del modelo generalizado.....	104
7.2	Condiciones de KKT	105
7.3	Nomenclatura de metodología	108

Índice de Tablas

Tabla 2-1.	Nomenclatura del modelo teórico.	16
Tabla 3-1.	Nomenclatura utilizada en las figuras.	32
Tabla 4-1.	Parámetros de las tecnologías utilizadas en el caso académico.	43
Tabla 4-2.	Descripción de la curva de duración de carga aproximada por seis bloques de igual duración.	44
Tabla 4-3.	Parque generador sin almacenamiento y sus costos.....	44
Tabla 4-4.	Costo adicional de cada configuración expuesta para el almacenamiento 1.	49
Tabla 4-5.	Resumen de configuraciones óptimas de carga-descarga para primera iteración.	50
Tabla 4-6.	Costo marginal (\$/MW) de la capacidad de almacenamiento en distintas configuraciones.....	52
Tabla 4-7.	Costo adicional de cada configuración expuesta para el almacenamiento 1, en la segunda iteración.	59
Tabla 4-8.	Resumen de configuraciones óptimas de carga-descarga para primera iteración.	60
Tabla 4-9.	Costo marginal (\$/MW) de la capacidad de almacenamiento en distintas configuraciones.....	60
Tabla 4-10.	Costo adicional de cada configuración expuesta para el almacenamiento 1, en la tercera iteración.	64
Tabla 4-11.	Resumen de configuraciones óptimas de carga-descarga para tercera iteración.	66
Tabla 4-12.	Costo marginal (\$/MW) de la capacidad de almacenamiento en distintas configuraciones.....	68

Tabla 4-13. Comparación de configuraciones para el almacenamiento 1.....	71
Tabla 4-14. Costos adicionales para la expansión de central de base.	73
Tabla 4-15. Resumen de configuraciones óptimas de carga-descarga para tercera iteración.	73
Tabla 4-16. Costo marginal (\$/MW) de la capacidad de almacenamiento en distintas configuraciones.....	74
Tabla 4-17. Comparación de configuraciones para el almacenamiento 1.....	78
Tabla 4-18. Costo marginal (\$/MW) de la capacidad de almacenamiento en distintas configuraciones.....	78
Tabla 4-19. Comparación de resultados obtenidos con la metodología desarrollada y el problema numérico equivalente. Capacidades en MW.	79
Tabla 4-20. Capacidades instaladas de recursos renovables que permiten penetración deseada. .	80
Tabla 4-21. Aproximaciones por bloques equiespaciados en distintos escenarios (MW).	81
Tabla 4-22. Bloques utilizados para aproximar las LDC en distintos escenarios.	82
Tabla 4-23. Parámetros de costos de tecnologías térmicas y almacenamiento al año 2050.....	83
Tabla 4-24. Parque generador obtenido con distintas metodologías. Capacidades en MW.....	84
Tabla 4-25. Comparación de resultados principales del trabajo con los obtenidos aplicando la metodología simplificada. Capacidades en MW.	86
Tabla 4-26. Comparación de primera iteración en caso con bloques equiespaciados para escenarios de 60 y 7% de penetración ERNC.....	90
Tabla 4-27. Comparación de duración de tecnologías de almacenamiento con distintas metodologías.....	92
Tabla 4-28. Parámetros representativos del número de ciclos en caso base y en caso modificado.	92
Tabla 4-29. Primera iteración del algoritmo sobre la planificación del Sistema Alemán. Costos marginales en (\$/MW).....	95
Tabla 4-30. Comparación de tiempos de cómputo de los casos analizados y una referencia externa.	96
Tabla 7-1. Nomenclatura de la metodología propuesta.....	108

Índice de Figuras

Figura 1-1. Tendencias recientes y proyecciones de costos de almacenamiento.	1
Figura 2-1. Poliedro factible.	6
Figura 2-2. Poliedro factible con ejemplos de direcciones factibles.	6
Figura 2-3. Curva de duración de carga y parque generador obtenido con método de Screening Curves.	9
Figura 2-4. Almacenamiento como central de punta.	18
Figura 3-1. LDC con generación y carga de tecnologías.	21
Figura 3-2. LDC aproximada por bloques abastecida por distintas tecnologías.	26
Figura 3-3. Generación de energía por una tecnología con igual capacidad instalada en dos parques generadores distintos.	27
Figura 3-4. Caso base con dos tecnologías térmicas.	31
Figura 3-5. Ejemplo del uso de Screening Curves para filtrar tecnologías de almacenamiento. ...	33
Figura 3-6. Posibles configuraciones de carga-descarga para un nuevo ESS en el mix.	34
Figura 3-7. Análisis gráfico de variación de costos producida por almacenamiento.	35
Figura 3-8. LDC y caso base cuando penetración de renovables produce horas con exceso de energía disponible.	38
Figura 3-9. Límites de capacidad de almacenamiento por descarga.	40
Figura 4-1. Curva de duración de carga aproximada por seis bloques de igual duración.	43
Figura 4-2. Obtención del parque generador térmico óptimo.	45
Figura 4-3. Configuraciones de carga-descarga posibles para el almacenamiento 1.	46
Figura 4-4. Detalle de la participación del almacenamiento 1.	51
Figura 4-5. Resultado de iteración 1 y caso base de iteración 2.	53
Figura 4-6. Configuraciones de carga-descarga factibles en segunda iteración para ESS 1.	54
Figura 4-7. Parque generador resultante de la segunda iteración.	61
Figura 4-8. Ingreso con expansión del almacenamiento 2.	67
Figura 4-9. Parque generador resultante de la tercera iteración.	68

Figura 4-10. Parque generador resultante de la cuarta iteración.	75
Figura 4-11. Perfiles normalizados de recursos renovables variables.....	80
Figura 4-12. Curva de duración de carga original y las tres LDC residuales obtenidas en escenarios de penetración renovable.	81
Figura 4-13. Curvas de duración de carga utilizadas en este caso.	85
Figura 4-14. Curva de duración de carga del problema y Screening Curves de tecnologías térmicas y ESS 2.	88
Figura 4-15. Comparación de resultados de distintas metodologías al ser aplicadas sobre tres escenarios de penetración renovable en el SEN al 2050.	89
Figura 4-16. Aplicación de metodología de Screening Curves con tecnología de Ion Litio.....	91
Figura 4-17. Comparación de resultados obtenidos con parámetro de ciclos modificado en distintas metodologías.....	93
Figura 4-18. Comparación de parque generador obtenido al aplicar distintas metodologías.....	94
Figura 7-1. Representación gráfica de la distribución de la generación/carga de las distintas tecnologías.	104