

## Tabla de contenido

Agradecimientos	iii
Tabla de contenido	iv
Índice de figuras	vi
1. Introducción	1
Motivación	1
Objetivos	1
Alcances	1
2. Antecedentes	2
Sistema Eléctrico Nacional	2
Energía geotérmica	3
Sistemas geotérmicos	3
Geotermia en Chile	5
Tecnologías de generación en plantas geotérmicas	8
Dry steam (vapor seco)	8
Single Flash (evaporación súbita)	9
Double flash (vaporización súbita doble)	10
Ciclo Binario (Organic Rankine Cycle)	10
EGS (sistema geotérmico mejorado)	11
Fluctuaciones de la energía geotérmica y la temperatura ambiente	12
Energía solar	14
Generación fotovoltaica	14
Concentración solar (CSP)	16
Planta CSP de cilindros parabólicos	17
Plantas híbridas	19
Esquemas de hibridación	21
Estado del arte	21

Planta híbrida de Nevada	23
3. Metodología	26
Evaluación técnica	26
Evaluación económica	26
Selección del lugar	26
Datos climáticos	27
Radiación	28
Temperatura	28
Perfiles de generación	29
Geotermia	30
Solar fotovoltaico	31
Concentración solar (CSP)	32
Caso de estudio	35
Producción de energía	36
Costos marginales	36
Ingresos por venta de energía	37
Ingresos por venta de potencia	38
Costos	40
Costos de inversión	41
Geotermia	41
Generación solar fotovoltaica	41
Solar CSP	42
Costos de operación y mantenimiento	43
Costos variables	44
Cálculo del costo nivelado de la energía (LCOE)	44
Flujos de caja y valor actual neto	45
4. Resultados y análisis	47
Resultados técnicos	47

Resultados económicos	53
Análisis de sensibilidad	57
5. Conclusiones	60
6. Bibliografía	61

## Índice de figuras

Figura 1. Capacidad instalada de generación en SING y SIC. ....	2
Figura 2. Regiones de alto flujo de calor y actividad geotérmica. ....	4
Figura 3. Campo geotérmico típico. ....	4
Figura 4. Mapa de favorabilidad geotérmica. Fuente [6]. ....	6
Figura 5. Escenario de proyectos geotérmicos en operación hasta 2030. Fuente: Mesa de Geotermia. ....	6
Figura 6. Escenarios de Capex unitario. Fuente: Mesa de Geotermia. ....	7
Figura 7. Escenario de LCOE para plantas geotérmicas en Chile. Fuente: Mesa de Geotermia. ....	8
Figura 8. Esquema de una planta geotérmica simple con separador. ....	8
Figura 9. Esquema de una planta geotérmica de vapor seco. ....	9
Figura 10. Esquema de una central geotérmica single flash. ....	9
Figura 11. Esquema de planta geotérmica double flash. ....	10
Figura 12. Esquema de planta geotérmica binaria. ....	11
Figura 13. Esquema de un sistema geotérmico mejorado. ....	11
Figura 14. Potencia normalizada y eficiencia termal versus temperatura ambiente con y sin energía solar termal. Fuente [12]. ....	12
Figura 15. Salida neta de potencia para los ciclos single flash y double flash en Imperial Valley, CA. Fuente [9]. ....	13
Figura 16. Eficiencia típica de planta ORC refrigerada con aire con respecto a la temperatura ambiente. Fuente [11]. ....	13
Figura 17. GK GEPP variación de potencia anual. Fuente [11]. ....	14
Figura 18. Juntura N-P. ....	15
Figura 19. Arreglo de paneles en planta de generación fotovoltaica. ....	15
Figura 20. Regiones apropiadas para CSP. ....	16
Figura 21. Tecnologías de concentración solar: linear Fresnel (izquierda), torre de concentración (derecha) y cilindros parabólicos (abajo). ....	17
Figura 22. Componentes del colector solar. ....	18
Figura 23. Planta CSP de cilindros parabólicos con almacenamiento y respaldo con	

combustibles fósiles.....	18
Figura 24. Esquema de planta híbrida fotovoltaica-geotermal.....	20
Figura 25. Esquemas de integración para hibridación CSP-geotermal. ....	21
Figura 26. Producción de electricidad simulada para una planta híbrida en Renmark versus demanda eléctrica del sur de Australia. Fuente: [18]. ....	22
Figura 27. Generación geotérmica y solar calculada con simulación hora a hora para los sitios seleccionados. Fuente: [19]. ....	23
Figura 28. Producción neta para generación geotérmica y solar PV en día típico de primavera. Fuente: [21]. ....	24
Figura 29. Esquema simplificado de la planta híbrida CSP-geotermal. Fuente: [5]. ....	24
Figura 30. Vista aérea de la planta híbrida PV-CSP-geotermal Stillwater, en Nevada.....	25
Figura 31. Estaciones meteorológicas en la región de Antofagasta y del Bío Bío. Fuente: Meteochile. ....	27
Figura 32. Promedio mensual de radiación global horizontal. ....	28
Figura 33. Promedio mensual de temperatura ambiente. ....	29
Figura 34. Potencia neta versus temperatura ambiente y línea de tendencia. ....	30
Figura 35. Ventanilla Location and Resource de la simulación en SAM.....	33
Figura 36. Promedio anual de costos marginales del sistema hasta 2050. ....	37
Figura 37. Evolución del precio de nudo de corto plazo 2007-2017. Fuente: CNE.....	38
Figura 38. Perfil de generación geotérmica para día típico de enero y julio en zona norte (escenario 1). ....	47
Figura 39. Perfil de generación geotérmica para día típico de enero y julio en zona sur (escenario 2).....	48
Figura 40. Efecto estacional de la temperatura ambiente en la energía geotérmica.....	48
Figura 41. Generación fotovoltaica, CSP y radiación en zona norte (escenarios 3 y 5). ....	49
Figura 42. Generación fotovoltaica, CSP y radiación en zona sur (escenarios 4 y 6).....	49
Figura 43. Producción de energía anual para cada escenario. ....	50
Figura 44. Producción de energía para escenarios de la zona norte y zona sur.....	50
Figura 45. Perfil diario de generación para planta híbrida solar PV-geotermal y caso base....	51
Figura 46. Generación geotérmica con y sin integración CSP para zona norte (escenario5)...	51
Figura 47. Generación geotérmica con y sin integración CSP para zona sur (escenario 6)....	52
Figura 48. Producción de energía para híbrido solar PV-geotérmico (escenario 3).....	52
Figura 49. Producción de energía para híbrido CSP-geotermal (escenario 5). ....	53
Figura 50. Costos de inversión para cada escenario. ....	53
Figura 51. Partida de costos de proyecto fotovoltaico. Fuente: Proyorsa Energía. ....	54
Figura 52. Partida de costos de proyecto fotovoltaico. Fuente: Proyorsa Energía. ....	54
Figura 53. Costo unitario de inversión referencial y para planta híbrida. ....	55
Figura 54. Costo nivelado de la energía (LCOE) para cada escenario.....	56
Figura 55. Valor actual neto calculado para cada escenario.....	56
Figura 56. Valor actual neto para casos de sensibilidad en la zona norte. ....	58

Figura 57. Efecto de instalar capacidad solar PV en el costo de desarrollo. ....	58
Figura 58. Efecto de instalar capacidad solar CSP en el costo de desarrollo. ....	59

## Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de la capacidad instalada en construcción y licitada del SEN. ....	3
Tabla 2. Clasificación de los recursos geotermales en °C según autor. ....	5
Tabla 3. Concesiones de exploración geotérmica en Chile. Fuente: SERNAGEOMIN. ....	26
Tabla 4. Coordenadas geográficas de estaciones meteorológicas. ....	27
Tabla 5. Promedio mensual de radiación global horizontal. ....	28
Tabla 6. Promedio mensual de temperatura. ....	29
Tabla 7. Perfil de generación geotérmico para Toconao. ....	30
Tabla 8. Perfil de generación geotérmico para Termas de Chillán. ....	31
Tabla 9. Perfil de generación geotérmico con hibridación CSP para Toconao. ....	31
Tabla 10. Perfil de generación geotérmico con hibridación CSP para Termas de Chillán. ....	31
Tabla 11. Perfil de generación solar fotovoltaica para Toconao. ....	32
Tabla 12. Perfil de generación solar fotovoltaica para Termas de Chillán. ....	32
Tabla 13. Parámetros para simulación en SAM de ventanilla Solar Field. ....	34
Tabla 14. Parámetros para simulación en SAM de ventanilla Power Cycle. ....	34
Tabla 15. Perfil de generación CSP para Toconao. ....	35
Tabla 16. Perfil de generación para Termas de Chillán. ....	35
Tabla 17. Casos de estudio y capacidad instalada por tecnología. ....	35
Tabla 18. Ejemplo de bloques del modelo PLP, primeras 5 filas. ....	37
Tabla 19. Asignación horaria de los bloques de modelación PLP. ....	38
Tabla 20. Potencia de suficiencia estimada para los distintos escenarios. ....	39
Tabla 21. Escenarios de análisis para Capex geotérmico alto. Fuente: Mesa de Geotermia. ....	41
Tabla 22. Partidas de costo no consideradas en híbrido solar PV (escenarios 3 y 4). ....	42
Tabla 23. Partidas de costo no consideradas en híbrido CSP (escenarios 5 y 6). ....	43
Tabla 24. Costos de operación y mantenimiento por tecnología. Fuente: CNE. ....	43
Tabla 25. Costos variables no combustibles por tecnología. Fuente: CNE. ....	44
Tabla 26. Ejemplo de flujo de caja operacional después de impuestos. Fuente [123]. ....	46
Tabla 27. Costo nivelado de la energía (LCOE) para cada escenario en estudio. ....	55
Tabla 28. Escenarios en estudio ordenados por valor actual neto. ....	57