

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Metodología de Trabajo.....	4
1.4. Estructura de Trabajo.....	5
2. Revisión Bibliográfica	6
2.1. ERNC en Chile	6
2.1.1. Energía Eólica en Chile	9
2.1.2. Energía Solar en Chile	11
2.2. Sistemas de Almacenamiento de Energía.....	12
2.3. Tecnología CAES	15
2.3.1. CAES Diabático	17
2.3.2. CAES Adiabático	18
2.3.3. Instalaciones CAES	18
2.3.4. Características Técnicas, Energéticas y Económicas	25
2.3.5. Ventajas y Desventajas.....	28
3. Formaciones Geológicas para CAES	30
3.1. Rocas Salinas	31
3.2. Rocas Porosas	36
3.3. Rocas Cristalinas	43
3.4. Riesgos Geológicos	48
4. CAES en Chile	50
4.1. Salares.....	56
4.1.1. Salar Grande	59
4.1.2. Salar de Lllamará.....	60
4.1.3. Salar de Atacama	62
4.1.4. Salar de Punta Negra	63
4.1.5. Salar de Pedernales.....	65

4.2. Acuíferos	67
4.2.1. Acuífero del Salar de Llamará.....	70
4.2.2. Acuífero del Salar de Atacama.....	70
4.2.3. Acuífero de Agua Verde.....	71
4.2.4. Acuífero de la Cuenca del Río Maule	72
4.2.5. Acuífero de Caleta Tubul	72
4.2.6. Acuífero de la Cuenca del Río Bueno	73
4.2.7. Acuífero de la Cuenca del Lago Llanquihue - Río Maullín	74
4.2.8. Acuífero de la Cuenca de Laguna Blanca	74
4.2.9. Acuífero de Tierra del Fuego.....	75
4.3. Reservorio de Hidrocarburos Agotados	76
4.4. Minas Abandonadas	80
4.5. Catastro de Formaciones Geológicas para CAES	83
5. Caracterización de Formaciones Salinas.....	86
5.1. Metodología.....	86
5.1.1. Pruebas y Ensayos de Laboratorio.....	89
5.1.2. Consideraciones en la Modelación.....	91
5.2. Ejemplo: Formación San Pedro.....	93
5.2.1. Geología Cordillera de la Sal	94
5.2.2. Estratigrafía Formación San Pedro.....	98
5.2.3. Geología Estructural.....	100
5.2.4. Domos de Sal.....	101
5.2.5. Modelación Preliminar	104
6. Discusión.....	109
6.1. Tecnología CAES	109
6.2. CAES en Chile	112
6.3. Metodología en Formaciones Salinas.....	117
7. Conclusiones y Recomendaciones	118
8. Bibliografía.....	121

9. Anexos	139
9.1. Sistemas de Almacenamiento de Energía.....	139
9.1.1. Almacenamiento de Energía Electromagnética.....	139
9.1.2. Almacenamiento de Energía Electro-Química.....	140
9.1.3. Almacenamiento de Energía Mecánica.....	141
9.1.4. Almacenamiento de Energía Térmica (TES).....	143
9.2. Equipamiento CAES.....	144
9.2.1. Compresores.....	144
9.2.2. Reservorio de Almacenamiento.....	145
9.2.3. Turbinas.....	147
9.2.4. Motor-Generador.....	147
9.2.5. Equipamiento Auxiliar.....	147
9.3. Cavernas Salinas.....	148
9.3.1. Construcción.....	148
9.3.2. Abandono.....	150
9.4. Propiedades Rocas Salinas.....	151
9.4.1. <i>Creep</i>	151
9.4.2. Permeabilidad.....	154
9.4.3. Fatiga.....	155
9.5. Leyes Constitutivas de Rocas Salinas.....	157
9.5.1. Modelos Reológicos.....	157
9.5.2. Modelos Empíricos.....	161
9.5.3. Modelos Físicos.....	162
9.6. Parámetros Geotécnicos de Rocas Cristalinas.....	167
9.6.1. Frecuencia de Fractura (FF).....	167
9.6.2. <i>Rock Quality Designation</i> (RQD).....	167
9.6.3. <i>Uniaxial Compressive Strength</i> (UCS).....	168
9.6.4. <i>Rock Mass Rating</i> (RMR).....	168
9.6.5. <i>Geological Strength Index</i> (GSI).....	169
9.6.6. <i>Tunneling Quality Index</i> (Q).....	170

Índice de Figuras

Figura 1: Sistemas Eléctricos chilenos.	7
Figura 2: Mapa de viento global.	9
Figura 3: Comparación de tecnologías de almacenamiento	13
Figura 4: Producción CAES diaria.	15
Figura 5: Esquema planta CAES.	16
Figura 6: Diagrama esquemático de planta CAES convencional.	17
Figura 7: Fotografía aérea planta Huntorf.	20
Figura 8: Modelo Regional Domos de Sal en la Costa del Golfo	21
Figura 9: Esquema ilustrativo Planta ADELE.	24
Figura 10: Costos de inversión de sistemas.	29
Figura 11: Profundidad y perfiles de cavernas existentes en formaciones salinas	31
Figura 12: Esquema fenómeno “bowl de subsidencia”..	33
Figura 13: Esquema ilustrativo de CAES en rocas porosas..	37
Figura 14: Esquema de Configuración CAES a presión constante.	44
Figura 15: Esquema ilustrativo de caverna revestida en roca cristalina.	46
Figura 16: Esquema configuración geológica chilena.	51
Figura 17: Potenciales sitios para CAES en Chile.	55
Figura 18: Esquema de dominios morfoestructurales del norte de Chile.	56
Figura 19: Unidades morfoestructurales y ubicación de los potenciales salares.	57
Figura 20: Configuración geológica del Salar Grande.	59
Figura 21: Sección estratigráfica Lomas de La Sal.	61
Figura 22: Columna estratigráfica y perfil del Salar de Atacama	62
Figura 23: Estratigrafía Superficial Salar de Punta negra	64
Figura 24: Esquema sección estructural Salar de Punta negra.	64
Figura 25: Perfil geológico NW-SE en Salar de Pedernales.	66
Figura 26: Ubicación potenciales acuíferos y provincias hidrogeológicas.	68
Figura 27: Sección transversal del acuífero de la zona SE del Salar de Lllamará.	70
Figura 28: Ubicación acuífero Caleta Tubul	73
Figura 29: Zona de exploración de hidrocarburos en la Región de Magallanes.	76
Figura 30: Figura con pozos en desuso del Yacimiento Victoria.	77
Figura 31: Perfil Regional 8	78
Figura 32: Registro de resistividad, permeabilidad y porosidad de pozo Victoria Este.	79
Figura 33: Corte general Mina Transito	80
Figura 34: Ubicación minas abandonadas de la Región de Coquimbo.	82
Figura 35: Diagrama de la metodología para la caracterización y evaluación.	88
Figura 36: Ubicación zona propuesta, rutas de acceso y gaseoductos del área.	93
Figura 37: Zonas favorables para energía fotovoltaica.	94
Figura 38: Perfil esquemático de la zona norte de la Cordillera de la Sal.	95
Figura 39: Columna estratigráfica Fm. San Pedro.	97
Figura 40: Mapa zona norte Cordillera de la Sal.	100
Figura 41: Esquema de la historia tectónica del Salar de Atacama	103
Figura 42: Bloques favorables dentro de la zona propuesta.	104
Figura 43: Perfil AA` tomado del cuadrángulo de Tular	105
Figura 44: Ubicación caverna dentro de uno de los domos salino en la Cordillera de la Sal.	106
Figura 45: Estratigrafía y Mallado de la modelación	106

Figura 46: Evolución de temperatura dentro de la caverna.....	107
Figura 47: <i>Stress</i> desviatóricos (30 ciclos).....	108
Figura 48: Criterio de dilatación DeVries <i>et al.</i> , 2005 (30 ciclos).	108
Figura 49: Potencial solar y eólico de Chile.....	109
Figura 50: Demanda energética proyectada para el año 2030.....	110
Figura 51: Deterioro de las cavernas en Huntorf tras 20 años de operación.....	111
Figura 52: Radiación global horizontal periodo completo en Chile.....	112
Figura 53: Velocidad del viento en las zonas Agua Verde y Caleta Tubul.....	114
Figura 54: Ubicación parques eólicos y minas abandonadas..	115
Figura 55: Esquema SMES.	139
Figura 56: Esquema PHS.	142
Figura 57: Tipos de revestimiento.....	148
Figura 58: Esquemas de lixiviación por disolución.....	149
Figura 59: Deformación <i>creep</i> en función del tiempo.....	152
Figura 60: Límite de dilatancia y de resistencia de corto plazo de rocas salinas.	153
Figura 61: Prueba de carga cíclica.....	156
Figura 62: Modelo reológico Maxwell.....	159
Figura 63: Modelo reológico Kelvin.....	160
Figura 64: Modelo reológico Brugers.	160
Figura 65: Diagrama de mecanismos de deformación de la sal.....	163
Figura 66: Esquemas de los mecanismos de difusión.....	164
Figura 67: Mecanismo de dislocación ascendente.	165
Figura 68: Mecanismo de dislocación por deslizamiento.....	165
Figura 69: Calculo GSI basado en descripciones geológicas.....	169

Índice de Tablas

Tabla 1: Matriz energética actual y proyectada del SIC.....	8
Tabla 2: Potencial eólico en Chile.....	10
Tabla 3: Características técnicas de sistemas de almacenamiento de energía.....	13
Tabla 4: Proyectos CAES en el mundo.....	19
Tabla 5: Propiedades geológicas Calizas Formación Columbus.....	23
Tabla 6: Parámetros técnicos de plantas operativas.	25
Tabla 7: Características energéticas CAES.....	26
Tabla 8: Comparación de costos de inversión de las distintas tecnologías.	27
Tabla 9: Propiedades de cavidades dentro de domos salinos.....	33
Tabla 10: Valores estimados de porosidad de distintas litologías.....	39
Tabla 11: Principales características de los acuíferos para CAES.....	40
Tabla 12: Valores estimados de conductividad hidráulica de distintas litologías.....	43
Tabla 13: Salares revisados.....	58
Tabla 14: Acuíferos revisados.....	69
Tabla 15: Minas en desuso de la zona litoral de la Región de Coquimbo.....	81
Tabla 16: Propiedades de las capas estratigráficas modeladas.....	107
Tabla 17: Valores RQD y calidad de la roca.....	167
Tabla 18: Clasificación de macizo según GSI.....	169