

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
Resumen .....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA .....	2
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo general .....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
• Conocer el estado del arte de las tecnologías de concentración solar de potencia (CSP). .....	3
1.5. RESULTADOS ESPERADOS .....	3
1.6. METODOLOGÍA.....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	9
2.1.1. Potencial energético renovable.....	9
2.1.2. Contexto energético de Chile .....	9
2.1.3. Descripción de las regiones de estudio.....	10
2.2. Comportamiento solar .....	13

2.2.1. Energía solar .....	14
2.2.2. Constante solar .....	14
2.2.3. Factores que influyen en la radiación solar incidente.....	15
La radiación electromagnética proveniente del Sol, se ve afectada en su paso por las distintas capas en factores como la: dispersión, absorción y reflexión. (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	
2.2.4. Conceptos de radiación solar .....	17
2.2.5. Instrumentos para la medición del recurso solar .....	18
2.2.6. Comportamiento de la tecnología.....	19
2.3. Fundamentos de la tecnología de concentración solar de potencia .....	23
2.3.1. Tecnologías de concentración solar de potencia (CSP).....	23
2.3.2. Sistema de receptor central.....	25
2.3.3. Receptor central .....	25
2.3.4. Torre solar .....	28
2.3.5. Campo de heliostatos.....	29
2.3.6. Sistemas de concentradores parabólicos.....	30
2.4. Fluido calefactor .....	31
2.4.1. Fluidos calefactores gaseosos.....	32
2.4.2. Fluidos calefactores líquidos .....	32
2.4.3. Medios calefactores sólidos.....	32
2.4.4. Fluidos calefactores con cambio de fase .....	33
2.5. Sistemas de almacenamiento de energía Térmicos .....	33
2.5.1. Integración de los sistemas de almacenamiento térmicos en las centrales de concentración solar de potencia (CSP).....	33
2.5.2. Sistemas de almacenamiento de calor sensible y latente.....	35

2.5.3. Principales sistemas de almacenamiento térmicos utilizados en tecnologías de concentración solar de potencia (CSP).....	37
2.6. Bloque de potencia .....	39
2.6.1. Ciclo Rankine .....	39
2.6.2. Ciclo Rankine real .....	41
2.6.3. Ciclo Rankine con recalentamiento intermedio.....	41
2.6.4. Ciclo Rankine regenerativo .....	43
<b>CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>44</b>
3.1. Bloque de potencia .....	45
3.1.1 Condiciones de operación de la planta .....	45
3.1.2 Procedimiento para determinar las propiedades del vapor en el ciclo Rankine .....	46
3.1.3 Procedimiento de cálculo y resultados de las propiedades de la sustancia de trabajo .....	48
3.2 Cálculos de transferencia de calor .....	51
3.1 Cálculos de transferencia de calor para el agua.....	51
3.2.2 Cálculos de transferencia de calor de las sales fundidas .....	53
3.3 Determinación de propiedades de las sales fundidas.....	54
3.4 dimensionamiento de la caldera .....	55
3.4.2 Procedimiento de cálculo para el coeficiente convectivo interior para la primera etapa.....	59
3.4.3 Determinación del coeficiente convectivo exterior para el proceso 1 .....	62
3.4.4 Área de transferencia de calor de la caldera .....	63
3.4.5 Determinación del tamaño de la coraza.....	64
3.5 Dimensionamiento del sobre calentador.....	66
3.5.1 Determinación del coeficiente convectivo interior.....	66
3.5.2 Determinación del coeficiente convectivo exterior .....	66

3.5.3	Determinación del área de transferencia de calor del sobre calentador .....	68
CAPÍTULO 4.	selección del emplazamiento y discusión de resultados.....	70
4.1	Selección del emplazamiento .....	71
4.1.1	Disponibilidad del recurso solar .....	71
4.1.2	Preselección de ubicaciones .....	72
4.1.3	Planos reguladores .....	73
4.1.4	Accesibilidad a la ubicación.....	76
4.2	Configuración del campo solar.....	80
4.2.1	Selección del colector solar .....	80
4.2.2	Punto de operación .....	81
4.2.3	Layout del campo solar.....	83
4.2.4	Inclinación de los heliostatos.....	90
4.3	Evaluación económica.....	91
4.3.1	Costos .....	92
4.3.2	Ingresos.....	93
4.4	Discusión de resultados .....	95
4.4.1	Ciclo Termodinámico .....	95
4.4.2	Sustancia de trabajo y fluido caloportador utilizado .....	95
4.4.3	Dimensionamiento de caldera y sobre calentador .....	96
4.4.4	Datos.....	97
4.4.5	Selección de la Ubicación.....	97
4.4.6	Adaptación del terreno.....	98
4.4.7	Generación de energía .....	98
4.4.8	Campo solar y altura de la torre .....	101
4.4.7	Posición del Sol e inclinación de los colectores .....	103

4.4.9	Comparación de valores obtenidos con respecto a una planta en operación.....	104
4.4.10	Análisis económico .....	106
CONCLUSIONES.....		107
Referencias .....		110
Anexo 1: Catálogo turbina SST200 Siemens .....		113
Anexo 2: Tabla de propiedades para vapor saturado.....		115
Anexo 3: Tabla para propiedades del líquido comprimido .....		116
Anexo 4: Tabla para propiedades de vapor sobrecalentado .....		117
Anexo 5: Cálculos para determinar las propiedades del agua en el ciclo rankine.....		118
Anexo 6: Cálculos de masas de los fluidos y transferencia de calor .....		122
Anexo 7: Cálculos para el dimensionamiento de la caldera.....		125
Anexo 8: Cálculos para el dimensionamiento del sobre calentador .....		131
Anexo 9: Cálculos para determinar el número de heliostatos requerido .....		138
Anexo 10: Flujo de caja.....		139

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Reacción nuclear para generar la energía solar. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	14
Figura 2.2: Espectro solar a nivel del mar y atmósfera. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	15
Figura 2.3: Esquema de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	16
Figura 2.4: Factores que afectan la radiación solar en la atmósfera. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	17
Figura 2.5: Diagrama y foto de un piranómetro. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	18
Figura 2.6: Esquema y fotografía de un pirheliómetro. Fuente: (García Valladares & Pilatowsky Figueroa, 2017).....	19
Figura 2.7: Efecto coseno sobre una superficie reflectiva. Fuente: (Barreiro, 2012).....	20
Figura 2.8: Pérdidas por sombras que un heliostato proyecta sobre otro. Fuente: (Barreiro, 2012).....	20
Figura 2.9: Pérdidas por bloqueo de un heliostato. Fuente: (Barreiro, 2012) .....	21
Figura 2.10: Pérdidas por atenuación atmosférica. Fuente: (Barreiro, 2012) .....	22
Figura 2.11: Pérdidas por desbordamiento de flujo. Fuente: (Barreiro, 2012).....	22
Figura 2.12: Esquema de un sistema de receptor central. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Sistema de torre solar. Estado y perspectiva, 2014).....	25
Figura 2.13: Receptores externos. Fuente: (Barreiro, 2012) .....	26
Figura 2.14: Receptor de cavidad. Fuente: (Barreiro, 2012).....	26
Figura 2.15: Estructuras de torre solar. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Sistema de torre solar. Estado y perspectiva, 2014).....	29
Figura 2.16: Esquema de un heliostato. Fuente: (Barreiro, 2012).....	29
Figura 2.17: Despliegue de heliostatos en un campo solar. Fuente: (Barreiro, 2012).....	30
Figura 2.18: Colectores cilíndricos parabólicos y sus principales componentes. Fuente: (Barreiro, 2012) .....	31

Figura 2.19: Esquema de un sistema de almacenamiento térmico directo. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	34
Figura 2.20: Esquema de almacenamiento indirecto. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	35
Figura 2.21: Transferencia de calor hacia un medio sensible. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	36
Figura 2.22: Transferencia de calor hacia un medio latente. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	36
Figura 2.23: Sistemas de almacenamiento de tanque Ruth. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	37
Figura 2.24: Sistema de almacenamiento panal de abeja con aire ambiental como fluido de trabajo. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	38
Figura 2.25: Sistema de torre solar con almacenamiento directo de sales fundidas. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Tecnologías de almacenamiento CSP, últimos desarrollos., 2014) .....	39
Figura 2.26: Esquema de un ciclo Rankine. Fuente: (Cengel & Boles, 2012).....	40
Figura 2.27: Diagrama de procesos de un ciclo Rankine ideal. Fuente: (Cengel & Boles, 2012). .....	40
Figura 2.28: Desviación de un ciclo Rankine real, respecto de un ciclo Rankine ideal. Fuente: (Cengel & Boles, 2012) .....	41
Figura 2.29: Esquema de un ciclo Rankine ideal con recalentamiento. Fuente: (Cengel & Boles, 2012).....	42
Figura 2.30: Gráfico temperatura v/s entropía de un ciclo Rankine con recalentamiento intermedio. Fuente: (Cengel & Boles, 2012).....	42
Figura 2.31: Esquema de un ciclo Rankine ideal regenerativo con calentador abierto. Fuente: (Cengel & Boles, 2012) .....	43
Figura 3.1: Diferencia de temperatura media logarítmica para un intercambiador a contraflujo. Fuente: (Cengel, Transferencia de calor y masa, 2007) .....	56

Figura 3.2: Geometría de distribución de tubos en un intercambiador de calor de tubos y coraza. Fuente: (W. Serth, 2007).....	65
Figura 4.1: Interfaz del explorador solar. Fuente: (Ministerio de Energía, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Universidad Austral de Chile, 2020) .....	72
Figura 4.2: Interfaz explorador de mapas del geo portal de Chile. Fuente: (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020) .....	74
Figura 4.3: Plan regulador de la ciudad de Calama. Fuente: (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020).....	74
Figura 4.4: Plan regulador de la seccional Cifuncho, comuna de Taltal. Fuente: (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020) .....	75
Figura 4.5: Explicación del plan regulador de la seccional Cifuncho, comuna de Taltal. Fuente: (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020) .....	75
Figura 4.6: Distancia entre la ubicación de la planta y la seccional Cifuncho. Fuente: (Ministerio de Bienes Nacionales, 2020) .....	76
Figura 4.7: Localización de la planta en María Elena. Fuente: Google Maps. ....	76
Figura 4.8: Localización de Aiquina. Fuente: Google Maps.....	77
Figura 4.9: Localización de Taltal. Fuente: Google Maps .....	77
Figura 4.10: Localización El Salvador. Fuente: Google Maps.....	78
Figura 4.11: Localización de Pinguito. Fuente: Google Maps. ....	78
Figura 4.12: Localización de Las Tazas. Fuente: Google Maps. ....	79
Figura 4.13: Heliostato Sanlucar 90. Fuente: (R. Mancini, 2000) .....	80
Figura 4.14: Radiación solar en Taltal. Fuente: (Ministerio de Energía, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Universidad Austral de Chile, 2020) .....	82
Figura 4.15: Ubicación del campo solar. Fuente: Google Earth. ....	83
Figura 4.16: Distancia del primer heliostato a la torre. Fuente: (Romero & Zarza, 2007) .....	84
Figura 4.17: Distancia radial y azimutal de un campo de heliostatos. Fuente: (Romero & Zarza, 2007).....	85
Figura 4.18 Perfil de elevación de la ubicación de los heliostatos. Fuente: Google Earth Pro.	87



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Factor de corrección para intercambiadores de calor de 1 paso por la coraza y 2,4,6, 8... pasos por los tubos. Fuente: (Cengel, Transferencia de calor y masa, 2007).....	57
Gráfico 3.2: Factor de corrección para intercambiadores de calor de 2 pasos por la coraza y 4, 8, 12... pasos por los tubos. Fuente: (Cengel, Transferencia de calor y masa, 2007).....	58
Gráfico 4.1: Potencia generada en cada mes del año. Fuente: Elaboración propia. ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Cuadro comparativo de las principales tecnologías CSP. Fuente: (Anapode Solar, 2020).....	24
Tabla 2.2: Factores que influyen en las tecnologías de colectores solares. Fuente: (Anapode Solar, 2020) .....	24
Tabla 2.3: Plantas con receptores agua/vapor. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Sistema de torre solar. Estado y perspectiva, 2014).....	27
Tabla 2.4: Plantas con receptores de sales fundidas. Fuente: (Buck, Giuliano, Gobereit, Uhlig, & Wilbert, Sistema de torre solar. Estado y perspectiva, 2014).....	28
Tabla 3.1: Condiciones de operación de la turbina SST-200. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 3.2: Propiedades de la sustancia de trabajo del estado 1. Fuente: Elaboración propia....	48
Tabla 3.3: Propiedades de la sustancia de trabajo para el estado 2 ideal. Fuente: Elaboración propia. ....	49
Tabla 3.4: Propiedades de la sustancia de trabajo para el estado 2 real. Fuente: Elaboración propia. ....	49
Tabla 3.5: Propiedades del vapor agua para el estado 3. Fuente: Elaboración propia. ....	50
Tabla 3.6: Propiedades de la sustancia de trabajo para el estado 4 ideal. Fuente: Elaboración propia. ....	50
Tabla 3.7: Propiedades de la sustancia de trabajo para el estado 4 real. Fuente: Elaboración propia. ....	51
Tabla 3.8: Flujo másico y transferencia de calor hacia el agua. Fuente: Elaboración propia. ..	53
Tabla 3.9: Dimensiones de tubos (BWG). Fuente: (W. Serth, 2007).....	61
Tabla 3.10: Espesor de tubos (BWG). Fuente: (W. Serth, 2007).....	61
Tabla 3.11: Cálculo de propiedades de sales fundidas para el proceso de evaporación. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 3.12: Diámetro de coraza para tubos 3/4 pulgadas como diámetro exterior y configuración cuadrada con separación de 1 pulgada entre centros. Fuente: (W. Serth, 2007)	65
Tabla 3.13: Número de Nusselt para diferentes secciones transversales y números de Reynolds. Fuente: (Cengel, Transferencia de calor y masa, 2007). ....	68
Tabla 4.1: Datos meteorológicos para la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.	73

Tabla 4.2: Datos meteorológicos para la región de Atacama. Fuente: Elaboración propia. ....	73
Tabla 4.3: Características del heliostato Sanlúcar 90 de la planta CCP. Fuente: (R. Mancini, 2000).....	81
Tabla 4.4: Distribución de heliostatos en el campo solar. Fuente: Elaboración propia. ....	88
Tabla 4.5: Ángulo de declinación solar durante el año y ángulo de inclinación de los heliostatos. Fuente: Elaboración propia.....	91
Tabla 4.6: Costos de operación y mantenimiento de acuerdo a la tecnología. Fuente: (Comisión Nacional de Energía, 2020) .....	93
Tabla 4.7: MWh generados por mes. Fuente: Elaboración propia. ....	94
Tabla 4.8: Indicadores de rentabilidad del proyecto. Fuente: Elaboración propia. ....	95