



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAS
SALMUERAS DEL SALAR DE ATACAMA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE
LITIO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

VICENTE BENJAMÍN LABBÉ HERRERA

PROFESOR GUÍA:
RAMÓN LUÍS FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

SANTIAGO DE CHILE

2022

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUA DE LAS SALMUERAS DEL SALAR DE ATACAMA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LITIO

El sistema actual de extracción de litio en Chile, y buena parte del mundo, está basado en la extracción de salmuera desde las napas subterráneas de cuencas salinas, para su posterior evaporación al ambiente en piscinas de gran superficie. En ese sentido, las aguas, al ser de gran salinidad, presentan una amplia variedad de minerales claves para la economía moderna. Ahora, el gran problema de este tipo de extracción es la degradación a largo plazo de los complejos ecosistemas colindantes a las cuencas, los cuales se han visto afectados por las faenas mineras de manera importante. Lo anterior puede tener por consecuencia la eventual destrucción de los equilibrios naturales de la zona, generando un daño irreversible.

En razón a lo anterior, se modeló una planta piloto que fuera capaz de reemplazar parte de la producción actual de litio de la zona. Se buscó que esta pudiese recuperar parte del agua y reinyectarla al salar, de manera que se mantenga un mejor balance de la zona, haciendo más sustentable la extracción. Para lograr esto, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de las tecnologías comerciales de desalinización, escogiendo modelar finalmente una planta *TVC-MED*. El modelo creado en Matlab consideró varios supuestos lógicos, así como pérdidas termodinámicas que buscaban acercarle lo más posible a la realidad. Luego, se consideraron 30 casos de estudio para ser introducidos dentro del código finalizado.

Una vez analizados los casos, se escogió aquel que entregaba las mejores características termodinámicas para el proceso de desalación. Los resultados que se obtuvieron de la planta de 5 efectos modelada fueron: flujo de salmuera final $M_{b,t} = 114,2 \left[\frac{kg}{s} \right]$, flujo de condensado final $M_{c,t} = 55,62 \left[\frac{kg}{s} \right]$, una salinidad de 260.260 [ppm] y un GOR de 7,71. Por lo tanto, la factibilidad técnica de la planta fue probada, entregando un flujo capaz de producir cerca de 11.907,68 [ton/año] de litio y devolviendo 1.754.032 [m^3 /año] de agua al salar. La planta diseñada cubre el 14% de la producción, devolviendo un 3,2% del déficit hídrico actual. Así, escalando al máximo la producción para cubrir toda la primera etapa, se recupera cerca de un 23% del total del proceso, obteniendo cerca del 40% del agua que se perdía en la primera fase del proceso. Para entregarle la energía necesaria a la planta desalinizadora, se diseñó un sistema de concentración solar tipo Fresnel lineal con 24 [hrs] de operación, respaldado con almacenamiento y una caldera a gas.

La evaluación económica reveló que, para el proyecto puro, se tiene un VAN de 371.448.944 [US\$] y una TIR de 27%, dando en principio factibilidad económica a la planta. Se realizó, además, un estudio de sensibilidad que entregó, en el peor de los casos, un VAN medio de 56.192.959 [US\$] y una TIR de cerca del 13%, confirmando la factibilidad económica del estudio. Se confirmó, por tanto, la factibilidad tecnoeconómica.

*Try not.
Do or do not,
there is no try.*

Master Yoda

Agradecimientos

Al momento de escribir estas palabras de agradecimiento me encuentro en un pequeño estado de incredulidad. La verdad es que uno nunca piensa cómo va a enfrentar estos momentos, ni mucho menos cómo será todo el proceso que a uno lo trae aquí. Sin duda que el camino universitario ha tenido sus etapas altas y bajas, momentos de estrés inimaginables, de descubrimientos emotivos y de carretes inolvidables. Pero lo lindo, siento yo, es poder reflexionar sobre la diferencia entre aquel mechón miedoso en su primer día y este momento, y darse cuenta de que todo valió la pena.

Quiero comenzar por agradecerles ahora y para siempre a mis viejos, quienes me apoyaron de las maneras en que pudieron y lograron, a punta de puro esfuerzo, hacer que yo no deba ni un peso a la hora de graduarme. Puedo dar fe, así como la gente que me conoce, que hicieron un tremendo trabajo en mi educación, basándolo todo en el amor y la comprensión que siempre me dieron. También a mis hermanos, por siempre estar ahí para lo que necesitare, en el pasado, presente y estoy seguro que también van a estar ahí en el futuro. Les agradezco por las grandes tardes de reuniones familiares y momentos felices que siempre me ayudaron a descansar de la vida de U.

A mis grandes amigos de toda la vida, la Comunidad (de variados apellidos, hoy Manriboy). Es posible que nunca lean esto, pero acá va a quedar escrito de todas formas. Son un pilar fundamental en mi vida. Siempre agradeceré las tardes de malones, memes idiotas, conversaciones profundas y reuniones en general, por lo que fuera. Se que esta amistad es para siempre y, aunque las cosas puedan cambiar mucho, siempre vamos a estar los unos a los otros. A la Sofi, al Fer, a los chiquillos de Redes, a la Flo, a Freddy y a toda la gente bacán que fui conociendo dentro y fuera de la U. Muchas gracias por ser parte de mi vida y compartir momentos especiales juntos, espero que nuestros caminos se sigan cruzando en el futuro.

Agradecer también al profesor Ramón por el apoyo y buena disposición conmigo y el trabajo en general, así como a los profesores de la comisión por aceptar ser parte de este trabajo.

Y por último, pero definitivamente no menos importante, a la persona más especial de mi vida. Gracias Javi, mi amor, por estar siempre ahí, apoyarme en los momentos más bajos de todo este trayecto y celebrar conmigo cada pequeña victoria. Llegaste de la nada y me cambiaste la vida, y por eso, siempre estaré agradecido contigo. Te amo con todo mi corazón y se que vamos a caminar juntos lo que sea que se venga.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes Generales | 1 |
| 1.1.1. Extracción del litio | 1 |
| 1.1.2. Desalinización de agua | 2 |
| 1.2. Motivación | 3 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.3.1. Objetivo general | 4 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 4 |
| 1.4. Alcances | 4 |
| 2. Antecedentes | 5 |
| 2.1. Procesos Térmicos de Desalinización | 5 |
| 2.1.1. Destilación flash de múltiple etapa (MSF) | 5 |
| 2.1.2. Destilación de múltiple efecto (MED) | 6 |
| 2.1.3. Destilación por compresión de vapor (VC) | 8 |
| 2.1.4. Desalinización por congelamiento (Frz.) | 9 |
| 2.2. Principios Fundamentales del Recurso Solar | 9 |
| 2.2.1. Tiempo solar aparente | 9 |
| 2.2.2. Ángulos solares | 10 |
| 2.2.3. Tiempos de amanecer y anochecer y duración del día | 14 |
| 2.2.4. Radiación solar | 14 |
| 2.3. Colectores Solares | 16 |
| 2.3.1. Colectores de captación regular | 17 |
| 2.3.2. Colectores de concentración | 18 |
| 2.4. Almacenamiento Térmico | 20 |
| 2.4.1. Calor sensible | 22 |
| 2.4.2. Calor latente | 23 |
| 2.4.3. Termoquímico reversible | 24 |
| 2.5. Salar de Atacama | 24 |
| 2.6. El Litio | 25 |
| 2.6.1. Proceso de producción | 25 |
| 2.6.2. Cadena de valor | 27 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.6.3. | Recursos, reservas y oferta | 28 |
| 2.6.4. | Precio | 30 |
| 2.6.5. | Demanda y mercados solicitantes | 31 |
| 2.6.6. | Proyecciones de oferta y demanda | 33 |
| 2.6.7. | Impacto ambiental y social | 34 |
| 3. | Metodología | 40 |
| 4. | Desarrollo | 42 |
| 4.1. | Elección de la Tecnología a Utilizar | 42 |
| 4.1.1. | Consideraciones previas | 42 |
| 4.1.2. | Comparación de tecnologías de desalinización | 43 |
| 4.1.3. | Elección de la tecnología a utilizar y sistema propuesto | 46 |
| 4.2. | Creación del Modelo | 47 |
| 4.2.1. | Supuestos del modelo | 49 |
| 4.2.2. | Parámetros de entrada | 49 |
| 4.2.3. | Balances de energía y masa | 50 |
| 4.2.4. | Dimensionamiento de equipos | 61 |
| 4.2.5. | Ajuste de áreas promedio | 62 |
| 4.2.6. | Puesta en marcha de la planta | 63 |
| 4.3. | Casos de Estudio | 64 |
| 4.4. | Planta Solar y Componentes Asociados a Ella | 64 |
| 4.4.1. | Dimensionamiento preliminar del campo solar | 64 |
| 4.4.2. | Dimensionamiento del almacenamiento térmico | 66 |
| 4.4.3. | Dimensionamiento del intercambiador de calor | 69 |
| 4.4.4. | Dimensionamiento de la caldera auxiliar | 69 |
| 4.4.5. | Elección de la tecnología colectora y dimensionamiento final | 70 |
| 5. | Resultados y Análisis | 71 |
| 5.1. | Validación | 71 |
| 5.1.1. | Validación por comparación numérica | 71 |
| 5.1.2. | Validación por sensibilidad | 72 |
| 5.1.3. | Validación de ajuste de áreas | 79 |
| 5.2. | Modelamiento de la Planta <i>TVC-MED</i> | 86 |
| 5.2.1. | Análisis de casos de estudio | 86 |
| 5.2.2. | Dimensionamiento de Equipos | 93 |
| 5.2.3. | Sensibilidad del rendimiento a la variación de la salinidad | 94 |
| 5.2.4. | Planta final | 99 |
| 5.2.5. | Continuidad de operación de la planta desalinizadora | 100 |
| 5.3. | Dimensionamiento de la Planta Solar | 102 |
| 5.3.1. | Dimensionamiento preliminar | 102 |
| 5.3.2. | Planta modelada en SAM | 107 |
| 5.4. | Evaluación Económica | 109 |
| 5.4.1. | Costos de inversión | 109 |
| 5.4.2. | Costos de operación y mantenimiento | 112 |
| 5.4.3. | Flujo de caja | 114 |
| 5.4.4. | Análisis de sensibilidad | 117 |

| | |
|---|------------|
| 6. Discusión y Conclusiones | 125 |
| 7. Glosario | 129 |
| Bibliografía | 131 |
| ANEXOS | 136 |
| Anexo A. Validación de Correlaciones | 137 |
| Anexo B. Código Matlab | 142 |
| Anexo C. Áreas de Intercambio Térmico | 150 |
| Anexo D. Continuidad de Operación de la Planta | 154 |
| Anexo E. Datos Introducidos en SAM | 155 |
| Anexo F. Datos de Almacenamiento | 159 |
| Anexo G. Marco Regulatorio del Litio en Chile | 162 |
| Anexo H. Datos de plantas CSP | 164 |
| Anexo I. Ejemplo de Flujo de Caja | 166 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 2.1. | Características principales de algunos PCM [11]. | 23 |
| 2.2. | Tasas de comisión según precio de carbonato de litio. Fuente: CORFO | 30 |
| 2.3. | Tasa de crecimiento anual de demanda del litio según área productiva [20] | 32 |
| 4.1. | Costos de desalar agua salobre o de mar según el tamaño de planta[28]. | 43 |
| 4.2. | Costos de desalar agua salobre o de mar según tipo de energía[28]. | 43 |
| 4.3. | Comparación de las características principales de tecnologías de desalinización térmicas [EP] | 44 |
| 4.4. | Datos de entrada y sus variaciones para los casos de estudio [EP] | 64 |
| 5.1. | Tabla de validación numérica del modelo creado [EP]. | 72 |
| 5.2. | Comportamiento de los flujos máxicos de alimentación, salmuera y condensado a medida que varía el número de efectos [EP]. | 75 |
| 5.3. | Variación de la presión del vapor motor y su influencia sobre el rendimiento [EP]. | 77 |
| 5.4. | Variación de parámetros clave a medida que varía la temperatura de aumento del fluido de alimentación [EP]. | 78 |
| 5.5. | Áreas promedio establecidas [EP]. | 81 |
| 5.6. | Tabla de variaciones de parámetros claves con área variable y fija [EP]. | 86 |
| 5.7. | Tabla comparativa con $P_m = 350[kPa]$ [EP]. | 86 |
| 5.8. | Tabla comparativa con $P_m = 700[kPa]$ [EP]. | 86 |
| 5.9. | Tabla comparativa con $P_m = 1550[kPa]$ [EP]. | 87 |
| 5.10. | Tabla comparativa con $P_m = 2000[kPa]$ [EP]. | 87 |
| 5.11. | Tabla comparativa con $P_m = 3000[kPa]$ [EP]. | 87 |
| 5.12. | Tabla comparativa con $P_m = 4500[kPa]$ [EP]. | 87 |
| 5.13. | Tabla comparativa con $n = 5$ [EP]. | 90 |
| 5.14. | Tabla de datos para el caso de estudio seleccionado [EP]. | 92 |
| 5.15. | Tabla de áreas promedio para el caso de estudio seleccionado [EP]. | 93 |
| 5.16. | Variación de parámetros clave a partir del redimensionamiento de áreas [EP]. | 93 |
| 5.17. | Variación de parámetros de rendimiento con salinidad final introducida en el modelo [EP]. | 94 |
| 5.18. | Valores de extracción por m^2 asociados a las salinidades anteriores (cada fila corresponde a cada salinidad; desde 200.000 a 280.000 [ppm]) [EP]. | 97 |
| 5.19. | Datos completos de la planta de desalinización final [EP]. | 99 |
| 5.20. | Productos finales producidos por la planta piloto [EP]. | 100 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.21. | Temperaturas características de la zona del Salar de Atacama [EP]. | 100 |
| 5.22. | Comparación de potencia estacionaria y de puesta en marcha [EP]. | 101 |
| 5.23. | Tabla de resultados de potencia de funcionamiento para la planta desalinizadora [EP]. | 102 |
| 5.24. | Tabla de resultados del área colectora para la planta solar [EP]. | 102 |
| 5.25. | Tabla de resultados para almacenamiento [EP]. | 104 |
| 5.26. | Tabla de resultados del intercambiador de calor [EP]. | 104 |
| 5.27. | Tabla de resultados para la caldera auxiliar [EP]. | 105 |
| 5.28. | Datos del colector solar LFR por defecto en SAM [EP]. | 106 |
| 5.29. | Parámetros finales de la planta solar modelada [EP]. | 107 |
| 5.30. | Parámetros finales del almacenamiento modelado [EP]. | 108 |
| 5.31. | Parámetros finales de la caldera auxiliar modelada [EP]. | 108 |
| 5.32. | Cálculo de costos de capital [EP]. | 111 |
| 5.33. | Costos asociados a las bombas del proyecto [EP]. | 112 |
| 5.34. | Costos asociados al capital humano [EP]. | 113 |
| 5.35. | Costos de operación y mantenimiento [EP]. | 113 |
| 5.36. | Depreciación lineal de activos [EP]. | 115 |
| 5.37. | Depreciación a través de los años de evaluación [EP]. | 115 |
| 5.38. | Casos financieros analizados [EP]. | 116 |
| 5.39. | Indicadores económicos de cada caso [EP]. | 116 |
| 5.40. | Variaciones para el proyecto puro [EP]. | 118 |
| 5.41. | Indicadores económicos de casos del proyecto puro [EP]. | 118 |
| 5.42. | Variaciones para el proyecto financiado al 20% sin inversión externa [EP]. | 119 |
| 5.43. | Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF20 [EP]. | 119 |
| 5.44. | Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF40 [EP]. | 120 |
| 5.45. | Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF60 [EP]. | 120 |
| 5.46. | Variaciones para el proyecto financiado al 20% con inversión externa [EP]. | 121 |
| 5.47. | Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF20IE [EP]. | 121 |
| 5.48. | Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF40IE [EP]. | 122 |
| 5.49. | Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF60IE [EP]. | 122 |
| 5.50. | Variaciones de la tasa de descuento para el caso más pesimista [EP]. | 123 |
| 5.51. | Indicadores económicos para variación de tasa de descuento en PF20IE.4 [EP]. . . . | 123 |
| A.1. | Datos calculados con las correlaciones [EP]. | 137 |
| A.2. | Datos calculados con las correlaciones (continuación) [EP]. | 138 |
| A.3. | Datos calculados con las correlaciones (continuación) [EP]. | 139 |
| A.4. | Errores porcentuales respecto a las tablas de vapor reales [EP]. | 140 |
| A.5. | Errores porcentuales respecto a las tablas de vapor reales (continuación)[EP]. . . . | 141 |
| C.1. | Variación en la temperatura del feed [EP]. | 150 |
| C.2. | Variación en el flujo másico de condensado [EP]. | 151 |
| C.3. | Variación en el flujo másico de precalentadores [EP]. | 151 |
| C.4. | Variación en el flujo másico de vapor [EP]. | 152 |
| C.5. | Variación en el flujo másico de salmuera [EP]. | 152 |
| C.6. | Variación en la salinidad [EP]. | 153 |
| C.7. | Variación en el BPE [EP]. | 153 |
| D.1. | Potencia de puesta en marcha para cada efecto [EP]. | 154 |
| D.2. | Potencia de puesta en marcha para cada precalentador [EP]. | 154 |
| D.3. | Potencia de puesta en marcha del condensador [EP]. | 154 |
| F.1. | Características cuantitativas de almacenadores líquidos de calor sensible [11]. . . . | 161 |

| | | |
|------|--|-----|
| F.2. | Características cuantitativas de almacenadores sólidos de calor sensible [11]. | 161 |
| H.1. | Datos relevantes para la comparación de plantas, extraídos de [60][61]. | 164 |
| H.2. | Datos relevantes para la comparación de plantas, extraídos de [62] | 165 |
| I.1. | Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 [EP]. | 166 |
| I.2. | Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 (continuación) [EP]. | 167 |
| I.3. | Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 (continuación) [EP]. | 167 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Principio de operación de un proceso MSF [5] | 6 |
| 2.2. | Proceso MED tipo MES [5] | 7 |
| 2.3. | Principio de operación de una planta VC [5] | 8 |
| 2.4. | Variación del camino solar durante los días de l año en el hemisferio norte [5]. | 11 |
| 2.5. | Variación anual de la declinación según descripción del hemisferio norte [5]. | 11 |
| 2.6. | Ilustración de los ángulos solares en la esfera de la Tierra [8] | 12 |
| 2.7. | Diagrama de los ángulos solares sobre una superficie inclinada [5]. Aquí, Φ corresponde a θ_z ; z a γ_s y Z_s a γ | 13 |
| 2.8. | Ilustración de las pérdidas que sufre la radiación solar al entrar en la atmósfera terrestre [8]. | 15 |
| 2.9. | Colectores solares estacionarios [9] | 18 |
| 2.10. | Imagen de un colector solar cilindro parabólico [10]. | 19 |
| 2.11. | Imagen de un reflector tipo Fresnel Lineal [10]. | 20 |
| 2.12. | Algunas funciones del almacenamiento de manera gráfica [11]. | 21 |
| 2.13. | Esquema de tecnologías por calor sensible [11]. | 22 |
| 2.14. | Comparación de los diferentes mecanismos de almacenamiento energético con respecto a diferentes parámetros [13]. | 24 |
| 2.15. | Proceso de extracción de sales de litio y potasio a través de salmueras [18] | 26 |
| 2.16. | Cadena de valor del litio [19] | 28 |
| 2.17. | Recursos y reservas de litio en el mundo [20] | 29 |
| 2.18. | Desgloce general de costos de producir compuestos de Li según tipo de producción [20] | 30 |
| 2.19. | Evolución del precio del litio en el mundo [19] | 31 |
| 2.20. | Porcentaje de uso del mineral de litio en 2010 y 2017 [20] | 32 |
| 2.21. | Proyección de oferta de LCE según el estudio citado [20] | 33 |
| 2.22. | Tasa de crecimiento anual de la demanda de litio según sector productivo [20] | 34 |
| 2.23. | Balance hidrológico sin explotación (años 80) [21] | 35 |
| 2.24. | Balance hidrológico con explotación (promedio entre 2000 y 2015) [21] | 36 |
| 2.25. | Mapa de la cuenca del Salar de Atacama. Se pueden apreciar las comunidades aledañas al mismo [27]. | 38 |
| 4.1. | Esquema del modelo TVC-MED a utilizar [EP] | 47 |
| 4.2. | Esquema del Termocompresor[EP] | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3. | Esquema del primer efecto del sistema [EP] | 52 |
| 4.4. | Esquema del precalentador [EP] | 53 |
| 4.5. | Esquema del efecto i-ésimo del sistema [EP] | 54 |
| 4.6. | Esquema de la flashbox [EP] | 56 |
| 4.7. | Esquema del condensador [EP] | 57 |
| 4.8. | Diagrama de algoritmo de balance de masa y energía [EP]. | 60 |
| 4.9. | Cuatro casos en que es útil utilizar la LMTD para determinar la diferencia de temperaturas. a) Contracorriente. b) Paralelo. c) Fuente con temperatura constante. d) Receptor con temperatura constante. [45] | 61 |
| 4.10. | Esquema de interacción entre ambas plantas [EP]. | 65 |
| 4.11. | Temperaturas características de algunos conceptos de almacenamiento térmico sensible [11]. | 68 |
| 5.1. | Variación de la concentración de salmuera según número de efecto [EP] | 73 |
| 5.2. | Variación de las temperaturas de los flujos según número de efecto [EP] | 74 |
| 5.3. | Variación del flujo másico creado de salmuera concentrada según número de efecto [EP] | 74 |
| 5.4. | Variación del área específica total de intercambio térmico a medida que aumenta la cantidad de efectos [EP]. | 76 |
| 5.5. | Variación del calor específico total a medida que aumenta la cantidad de efectos [EP]. | 76 |
| 5.6. | Variación de los flujos a medida que varía la temperatura en el condensador [EP]. | 79 |
| 5.7. | Variación del GOR a medida que aumenta la temperatura entre el vapor caloportador y la salmuera del efecto [EP]. | 79 |
| 5.8. | Área de cada efecto [EP]. | 80 |
| 5.9. | Área de cada precalentador [EP]. | 81 |
| 5.10. | Error porcentual de las temperaturas de alimentación con área variable y fija [EP]. | 82 |
| 5.11. | Variación del flujo másico de salmuera con área variable y fija [EP]. | 82 |
| 5.12. | Variación del flujo másico de vapor producido con área variable y fija [EP]. | 83 |
| 5.13. | Variación del flujo másico de condensado con área variable y fija [EP]. | 83 |
| 5.14. | Variación del flujo másico en los precalentadores con área variable y fija [EP]. | 84 |
| 5.15. | Variación del flujo salino en los efectos con área variable y fija [EP]. | 85 |
| 5.16. | Variación del BPE en los efectos con área variable y fija [EP]. | 85 |
| 5.17. | Comparación gráfica del GOR, dependiente de las presiones motoras [EP]. | 88 |
| 5.18. | Comparación gráfica de la salmuera, dependiente de las presiones motoras [EP]. | 89 |
| 5.19. | Comparación gráfica del calor específico, dependiente de las presiones motoras [EP]. | 89 |
| 5.20. | Razón de arrastre en función de la presión para n=5 [EP] | 91 |
| 5.21. | Área específica en función de la presión para n=5 [EP]. | 91 |
| 5.22. | GOR en función de la presión para n=5 [EP]. | 92 |
| 5.23. | Salmuera en función de la presión para n=5 [EP]. | 92 |
| 5.24. | Variación de la diferencia entre la salmuera final ingresada al modelo y la ajustada por la variación de áreas [EP]. | 95 |
| 5.25. | Variación del GOR con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP]. | 95 |
| 5.26. | Variación del Área específica con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP]. | 96 |
| 5.27. | Variación del flujo de salmuera con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP]. | 96 |
| 5.28. | Diferencia entre el litio extraído por sistema tradicional y el extraído por el sistema propuesto en [ppm] [EP]. | 98 |
| 5.29. | Variación del dinero obtenido por la producción vs el área de intercambio térmico [EP]. | 98 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.30. | Potencia necesaria para la puesta en marcha a través del año [EP]. | 101 |
| 5.31. | Funcionamiento de módulo de almacenamiento de concreto [57] | 103 |
| 5.32. | Dimensiones del módulo de almacenamiento [57]. | 108 |
| 5.33. | Distribución de costos del proyecto [EP]. | 110 |
| 5.34. | Distribución de costos dentro de la planta desalinizadora [EP]. | 112 |
| 5.35. | VAN y TIR según tipo de financiamiento [EP]. | 117 |
| 5.36. | VAN y TIR según sensibilidad del proyecto puro [EP]. | 119 |
| 5.37. | VAN y TIR según sensibilidad en proyecto financiado al 20% [EP]. | 120 |
| 5.38. | VAN y TIR según sensibilidad en proyecto financiado al 20% con inversión externa [EP]. | 122 |
| 5.39. | VAN y TIR según el cambio de la tasa de descuento en el caso PF20IE.4 [EP]. | 124 |
| F.1. | Características cualitativas de los almacenamientos por calor sensible [11] | 160 |

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. Extracción del litio

El litio es el metal más ligero de la tabla periódica de elementos; se encuentra de manera natural en aproximadamente 145 minerales, además de presentarse en salmueras, aguas termales y agua de mar, haciéndolo uno de los metales más abundantes en la tierra. Cerca del 70% de las reservas mundiales de este elemento se encuentran en el denominado "triángulo del litio", correspondiente a una zona en la Cordillera de los Andes que abarca a los países de Argentina, Chile y Bolivia. En Chile, la mayor parte de este elemento se encuentra en depósitos salinos de la alta cordillera. Hoy en día, la extracción de litio se realiza mayoritariamente en los salares del país, siendo el Salar de Atacama el más explotado dentro de este grupo, debido a los bajos costos de capital que significa. En este contexto, los derechos sobre la explotación le corresponden a dos empresas: Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y Albemarle Corporation. El salar previamente señalado, en conjunto con el Salar del Hombre Muerto en Argentina, producen cerca del 60% del litio de alto grado en todo el mundo [1].

El proceso de obtención del litio en salares consiste en la extracción de grandes cantidades de salmuera y la consecuente evaporación de la misma, aumentando el porcentaje en peso de las sales de litio. Para lograr esto, la salmuera es bombeada desde depósitos salinos subterráneos hacia la superficie, tras lo cual es depositada en piscinas de gran área en las que se evapora gracias a la radiación solar. La extracción final de litio se produce en la última piscina de una serie de estas, en las cuales se precipitan diferentes compuestos tales como halita ($NaCl$) y silvita (KCl) hasta obtener un 6% de concentración de Li , 30 veces más que la inicial. A partir de este punto se puede tratar el resultado para obtener carbonato de litio (Li_2CO_3) e hidróxido de litio ($LiOH$). En el transcurso de la evaporación se precipitan ciertos subproductos como el boro (B) y el magnesio (Mg) que pueden ser contaminantes para el producto final que se busca obtener, por lo que deben ser extraídos antes del procesamiento final. Según datos obtenidos de la página de SQM, el proceso total dura más de 1 año desde su bombeo hasta que la solución final es llevada a plantas de tratamiento ubicadas en la misma región.

1.1.2. Desalinización de agua

Existen 3 métodos principales para desalinizar agua en la actualidad; por medios químicos, de presión o térmicos. En virtud de lo anterior, diferentes factores deben analizarse antes de seleccionar una tecnología por sobre otra tales como, gasto energético, salinidad presente en el agua, salinidad del agua producto, impacto ambiental y costo.

Los procesos de desalinización por activación química corresponden a aquellos en los que la separación de las sales se logra por medio de la adición de químicos específicos, los cuales logran precipitar las sales indeseadas obteniendo así el agua producto. Los 3 más conocidos en este subgrupo son el *Ion-Exchange Desalination*, *Liquid-Liquid Extraction* y el *Gas Hydrate*.

Por otra parte, los métodos que aprovechan gradientes de presión para la desalinización, suelen utilizar membranas con mallados microscópicos que permiten separar las sales presentes en la solución. Suelen ser los más conocidos además de los más utilizados en la desalinización de agua de mar para consumo humano o industrial. A este respecto, los procesos más característicos son la ósmosis, ósmosis inversa, electrodiálisis y nanofiltración. En esta línea, cabe destacar que la ósmosis inversa es el proceso más utilizado en la actualidad.

Por último, los procesos de desalinización térmica consisten en aprovechar la evaporación y condensación de agua para realizar la separación de sales, obteniendo de esta manera el agua producto. Estos incluyen la destilación flash de múltiple etapa (MSF), destilación de múltiple efecto (MED), destilación por compresión de vapor (VC), desalinización por humidificación-deshumidificación (HDH), destilación solar (SD) y congelado (Frz.) [2].

Para el estudio de desalinización de agua es necesario definir dos parámetros importantes de diseño: el Gained Output Ratio (GOR) y el Performance Ratio (PR). El GOR se define como la medida de cuánta energía termal es consumida en el proceso de desalinización. Típicamente se mide en kilogramos de agua destilada por kilogramo de vapor consumido. Usualmente, el valor de este parámetro fluctúa entre 1-10, en el cual los valores más bajos representan aplicaciones con alta disponibilidad de energía térmica de bajo valor. Por el contrario, GOR tan altos como 18 suelen encontrarse en aplicaciones donde el valor de energía local es muy elevado, cuando la necesidad de agua es muy grande o una combinación de ambas situaciones [3].

El PR es un parámetro extraído directamente de una interpretación específica del GOR. Este relaciona la cantidad de kg de agua obtenida a partir del calor equivalente de evaporar un kg de vapor. En términos del sistema internacional de medidas (SI) corresponde a 2.326 [kJ] o a 1.000 [BTU] en el sistema imperial; así, el PR se relaciona en términos de $\text{kg}/2.326\text{kJ}$ [3].

1.2. Motivación

El proceso actual de extracción de litio en salares requiere de la evaporación solar de grandes cantidades de agua -cerca de 2.142 [l/s]- en piscinas poco profundas, estas cantidades son equivalentes al total de agua disponible para consumo humano y agricultor de baja escala en la Región de Antofagasta. Si bien el proceso está favorecido por la alta radiación solar en la zona, presenta un bajo nivel de eficiencia, evaporando cerca del 95 % del agua que pasa por él sin recuperación alguna [4].

La sobreexplotación de este recurso, sumado a la nula recuperación de agua, significa una baja esperanza de operación a largo plazo, amenazando además el equilibrio de los ecosistemas de la zona creado durante siglos de manera natural. Por otro lado, el hecho de que sea un proceso expuesto al aire libre significa que está sujeto a las condiciones del medio ambiente, teniendo que detenerse cada vez que ocurren lluvias, las cuales han aumentado su frecuencia entre los meses de enero y marzo debido al cambio climático. Otro punto que debe tomarse en cuenta son los crecientes conflictos e impactos sociales que la extracción del agua ha estado generando en las localidades de la zona.

Los procesos de desalinización térmica fueron considerados no factibles durante muchos años por requerir combustibles fósiles; sin embargo, las mejoras introducidas a estas tecnologías permiten el uso de energía solar para su funcionamiento, disminuyendo considerablemente sus costos. De esta forma, se ha abierto la oportunidad de utilizar estas tecnologías en zonas de alta radiación solar, aprovechando el recurso de manera más eficiente.

Habiendo considerado lo previamente señalado y la necesidad que existe de encontrar una mejor manera de aprovechar el recurso hídrico, surge la idea de reemplazar el proceso tradicional por un sistema de desalinización térmica solar que permita recuperar la mayor parte del agua evaporada, facultando una mejor utilización del abundante recurso solar de la zona. Dado lo anterior, se propone determinar las características principales de la tecnología, de manera de crear un modelo que permita generar una ingeniería conceptual del proceso, y evaluar finalmente la factibilidad técnica, económica y medioambiental de este frente al proceso actual.

1.3. Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general del trabajo de título, además de los objetivos específicos que permitirán cumplirlo.

1.3.1. Objetivo general

Estudiar la factibilidad tecnoeconómica de implementar un sistema de evaporación y recuperación de agua, como alternativa al proceso actual de extracción de litio en el Salar de Atacama.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar y analizar la información necesaria para escoger una tecnología adecuada.
- Definir el proceso a usar para recuperar el agua y las salmueras concentradas.
- Crear y validar un modelo computacional que simule el sistema.
- Desarrollar y escoger un caso de estudio óptimo para la planta con la tecnología escogida.
- Evaluar económicamente el proyecto.
- Discutir la factibilidad de la planta con respecto al proceso actual.

1.4. Alcances

- Debido a que cada salar presenta composiciones de salmuera diferentes, este estudio se centrará en las características de la salmuera del Salar de Atacama. Para que este trabajo pueda ser replicado, deberá hacerse un análisis pertinente de las características de cada salar y elegir la tecnología adecuada.
- El estudio se realizará para una escala de producción específica, definida por el flujo de salmuera a procesar por unidad de tiempo.
- Debe tenerse en cuenta que cerca del 61 % del flujo de agua es evaporado en la primera etapa del proceso en cuestión. Bajo esta línea, el presente trabajo sólo se centrará en el reemplazo de la primera etapa, las otras tres etapas quedarán con la tecnología de evaporación solar actual.
- Por último, se espera que el estudio revele la ventaja de utilizar procesos de evaporación y recuperación de agua por sobre el proceso de evaporación solar actual, por lo tanto, se buscará establecer la configuración y número óptimo de etapas que permita favorecer la economía del sistema.

2.1. Procesos Térmicos de Desalinización

Los procesos térmicos de desalinización pueden ser separados en dos tipos principales: directa e indirecta. Los procesos directos son aquellos que utilizan energía solar para evaporar el agua, no suelen tener rendimientos altos y dependen directamente de las condiciones medioambientales de la zona. Este tipo de proceso suele ser utilizado en zonas con altos índices de radiación y baja utilización del agua, necesitando de grandes áreas para su uso eficiente. Ahora bien, suele tener utilidad competitiva a baja escala debido al uso de menores áreas para desalinizar [5].

Los métodos indirectos involucran dos sistemas que interactúan por medio de intercambiadores de calor, el sistema térmico y el de desalinización de agua. Este puede ser realizado por diferentes tecnologías como destilación flash de múltiple etapa (MSF), destilación de múltiple efecto (MED), destilación por compresión de vapor (VC) o congelado (Frz.).

2.1.1. Destilación flash de múltiple etapa (MSF)

Tal como su nombre indica, esta tecnología basa su método de destilación en el principio *flash*. Este consiste en disminuir de manera súbita la presión del agua de alimentación, llegando a una presión por debajo de su presión de vapor de equilibrio y ocurriendo así una evaporación prácticamente instantánea de la misma.

El proceso completo de destilación consiste en el precalentamiento del agua de alimentación, aprovechando el calor del proceso, para luego calentar el agua a temperatura de ebullición por medio de una fuente externa. Posteriormente, se introduce esta agua en cámaras sucesivas cuya presión y temperatura decrecen con cada etapa, produciéndose en cada una de estas el proceso *flash* explicado anteriormente. En cada una de las cámaras, el vapor producido pasa por filtros llamados desnebulizadores o separadores de niebla, encargados de separar las gotas de salmuera que podrían estar presentes en el vapor [5].

El precalentamiento del agua salina se produce por medio de intercambiadores de calor, estos se encargan tanto de este proceso como de la condensación del agua producto dentro de las cámaras flash, como se aprecia en la figura 2.1. El condensado final es el agua producto destilada después de pasar por todas las etapas flash correspondientes.

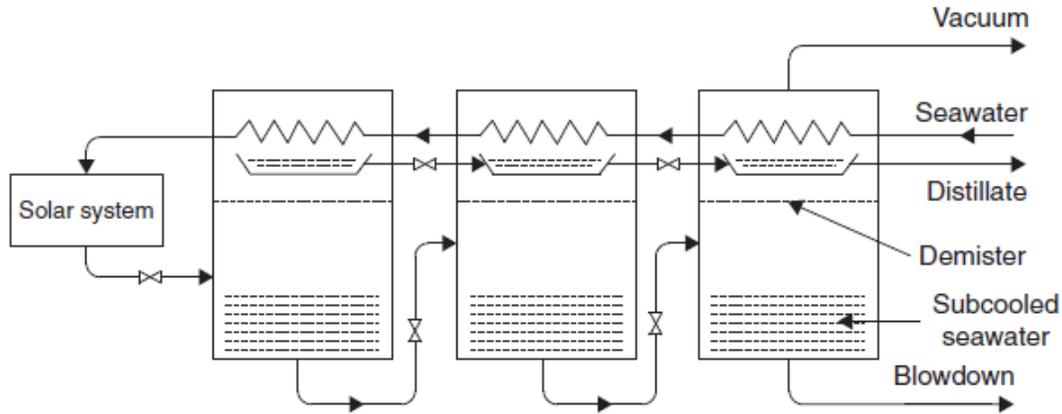


Figura 2.1: Principio de operación de un proceso MSF [5]

La temperatura a la que llega el agua en la primera etapa suele estar entre los 90 y 110 [°C], a esta se le llama temperatura “top” y estará en función del número de etapas y GOR de la tecnología. También, dependiendo de esta temperatura y la calidad de agua que es entregada, la recuperación máxima es de 12-20 %. El GOR de las MSF suele fluctuar entre 7 y 9, con un límite práctico de 11 [6]. Cuando se trabaja con plantas MSF con energía solar, estas pueden llegar a producir de 6-60 [l/m²/día], comparadas a las 3-4 [l/m²/día] del método directo de desalinización de agua [7].

2.1.2. Destilación de múltiple efecto (MED)

El método por destilación de múltiple efecto tiene una base de funcionamiento parecida al MSF, sin embargo, en vez de utilizar únicamente el método flash, este se basa mayoritariamente en múltiples evaporaciones simples. La salmuera con la que se alimenta al sistema es precalentada por el vapor de los diferentes efectos o etapas, en este método, sin embargo, el vapor no es condensado completamente en este intercambio de calor, sino que en la etapa siguiente, utilizando esta energía para evaporar el agua de esta etapa. En razón de lo anterior, se tiene que condensar el destilado de la última etapa, ya sea por un intercambiador de calor o aumentando la presión del fluido.

Se utiliza calor de una fuente externa para evaporar la salmuera precalentada pero, a diferencia del MSF, esto se hace en la primera etapa, no en un calentador externo; se disminuye la temperatura y presión de operación en cada efecto. Además, dependiendo de la configuración, es necesario pasar el condensado de cada etapa por un separador de vapor pequeño, reinyectando el vapor extraído al que calentará el agua del siguiente efecto.

La MED presenta múltiples variaciones a la hora de implementarse, dependientes de la configuración en los intercambiadores de calor y de los flujos de los fluidos que recorren el sistema. Hoy

en día, las configuraciones más típicas corresponden a intercambiadores de tubos y placas, ya sean verticales u horizontales, de los cuales se desprenden los sistemas pasivos y forzados, correspondientes a aquellos que van a favor o en contra de la gravedad respectivamente. Uno de los más utilizados es el tipo *Long Tube Vertical* (LTV), en el que el destilado se genera dentro de los tubos y la separación de concentrado salino y vapor se forma fuera de ellos. Otro tipo de MED es el llamado *Multiple-Effect Stack* (MES) caracterizado por presentar las etapas una sobre la otra en disposición vertical; suele ser la mejor configuración para el uso de energía solar debido a su estable operación entre 0% y 100% de output, incluso cuando suceden cambios repentinos en el suministro de vapor. La figura 2.2 muestra un ejemplo de y MES.

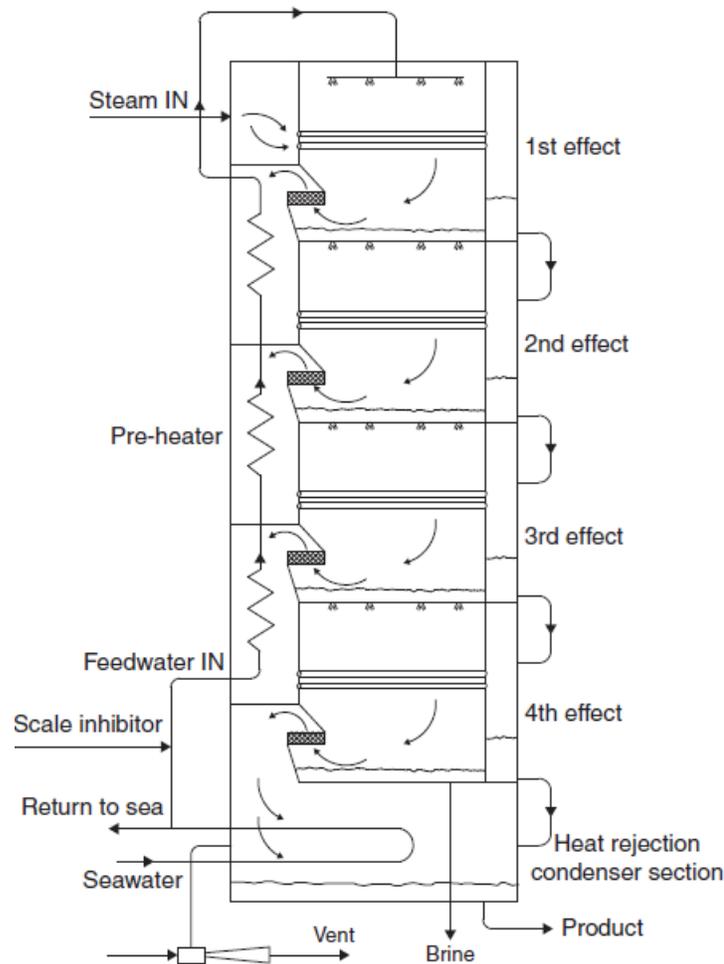


Figura 2.2: Proceso MED tipo MES [5]

A diferencia del MSF, el GOR para las plantas MED está directamente ligado al número de efectos y no puede exceder un número fijado por la cantidad de etapas. Este usualmente es $(N-1)$ el número de etapas, por ejemplo, para un GOR de 8 el número de efectos debería ser 9. Para una planta MSF de GOR equivalente el número de etapas sería considerablemente mayor, esta disminución de etapas rebaja los costos de capital asociados de manera considerable.

La temperatura “top” de los sistemas MED suele ser más baja que los sistemas MSF, ubicándo-

se entre 65 y 70 [°C]. Al igual que en el MSF, la cantidad de agua recuperada depende de la calidad del agua y la temperatura “top”, obteniéndose cerca del 30 % al 40 % [6]. Para una simulación con radiación solar de 4,8 [Wh/m²] se obtuvo una tasa de producción de 25 [l/m²/día], correspondiente a un PR de 3,5 [7].

2.1.3. Destilación por compresión de vapor (VC)

En un sistema VC la recuperación de calor se basa en aumentar la presión del vapor por medio de un compresor. Al aumentar la presión, la temperatura de saturación aumenta y la energía del fluido comprimido puede ser utilizada para evaporar el agua de su misma etapa o de la siguiente. El diseño general de las plantas VC es similar a las plantas MED, produciéndose vapor en el primer efecto que luego será utilizado para evaporar el agua del siguiente, la cual se encuentra a una menor presión. La diferencia es que el vapor proveniente del último efecto es comprimido y regresado al primer efecto. Una ilustración del procedimiento básico puede apreciarse en la figura 2.3.

Las plantas VC suelen presentar altos PR, esto se genera debido a que el calor latente es prácticamente reciclado a través del sistema, todo a cambio de un input importante de energía producido por el compresor. Esta cantidad de energía suele entregarse por medio de un motor Diesel que logra aportar la energía necesaria para el funcionamiento del compresor. Sumado a esto, se tiene que el calor producido por el motor puede ser extraído para calentar el agua del proceso [5].

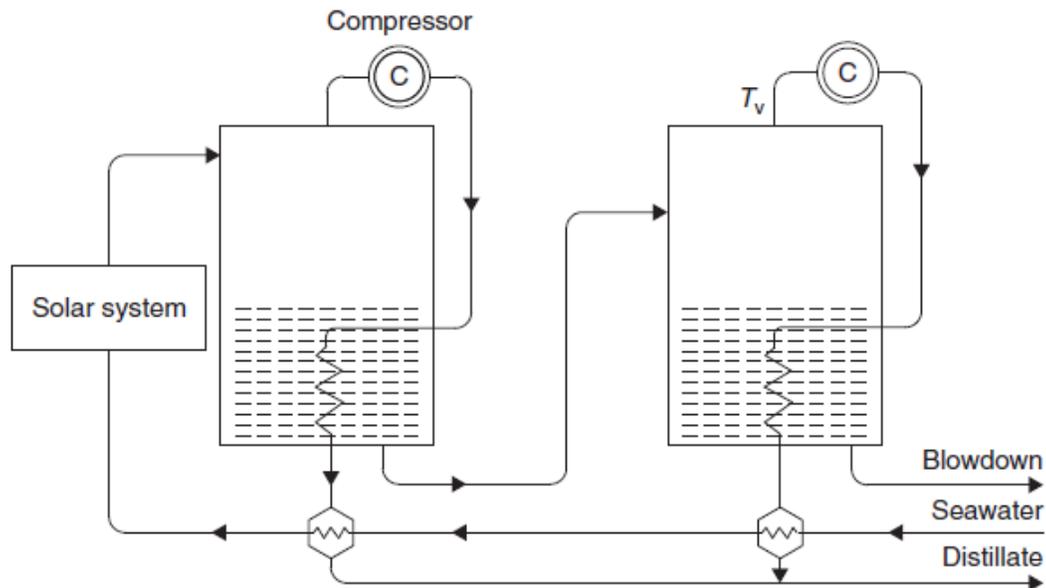


Figura 2.3: Principio de operación de una planta VC [5]

Los compresores que pueden utilizarse para este propósito son dos: un compresor mecánico (MVC) o un termocompresor (TVC). En los MVC la energía que se le entrega a este determina la magnitud del aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. La capacidad de estos se encuentra limitada por el flujo máximo volumétrico del compresor y la presión que desarrolle, la temperatura a la que opera y la capacidad de transmisión de calor de los intercambiadores. Los TVC son bastante similares a los MVC en su funcionamiento, su diferencia principal radica en la

presencia de evaporadores de diferentes tipos y configuraciones. Este tipo de compresor suele ser menos eficiente que el MVC y, por tanto, requiere de un gran número de etapas para un aprovechamiento correcto del mismo [6].

La temperatura “top” de las plantas VC suele estar entre 60 y 65 [°C], presentando recuperaciones de agua de entre 40% y 50%, nuevamente dependientes de la temperatura “top” y la calidad del agua de la zona [6].

2.1.4. Desalinización por congelamiento (Frz.)

Este método consiste en utilizar un ciclo estándar de refrigeración para los efectos de congelar el agua de alimentación. Lo anterior genera una precipitación de las sales presentes en el hielo permitiendo separar ambos por procesos mecánicos.

La desalinización por este medio ha sido propuesta por varias décadas, sin embargo, a la fecha no se cuenta con plantas reales en operación, siendo todos sus usos meramente demostrativos. Sin embargo, dado que el calor latente de fusión del agua es menor que el de evaporación, no sería extraño que dada una mayor investigación del proceso este pueda aplicarse en el futuro. Además, debe tenerse en cuenta la menor presencia de corrosión a bajas temperaturas, baja precipitación y abrasión a las cañerías.

Sin perjuicio de lo previamente señalado, el proceso se mantiene a baja escala debido al alto costo y las complicaciones asociadas a los procesos de refrigeración, además de la necesidad de limpiar el agua antes de derretir el hielo producido [7].

2.2. Principios Fundamentales del Recurso Solar

Para poder estudiar el funcionamiento de las tecnologías de acumulación solar térmica, es necesario entender ciertos conceptos y principios básicos del recurso solar en cuestión. En esta sección, se explicarán aquellos que toman mayor relevancia en las aplicaciones de la energía solar térmica. Así, destacan los conceptos de irradiancia y tiempo solar aparente, y los ángulos solares importantes (declinación, azimut, ángulo horario, altura solar, entre otros).

2.2.1. Tiempo solar aparente

Otro de los conceptos útiles a conocer es el denominado tiempo solar aparente o (AST por sus siglas en inglés). Este valor permitirá saber la posición aproximada del Sol en el día, relacionando esta con un horario para cada momento. En este sentido, es bueno notar que, debido a la inclinación de la tierra sobre su eje, el AST usualmente será diferente a la hora local.

Para convertir el tiempo local (LST) a AST, dos correcciones se deben introducir: la ecuación del tiempo y la corrección de longitud.

Ecuación del Tiempo (ET)

Esta ecuación surge debido a que la duración de un día en la Tierra no es constante durante el año. Así, se hace necesario introducir una corrección que dependa del día del año en que se esté. La ecuación que caracteriza este valor es la siguiente:

$$ET = 9,87 \cdot \sin 2B - 7,53 \cdot \cos 2B - 1,5 \cdot \sin B \quad [min] \quad (2.1)$$

Donde $B = (N - 81) \cdot \frac{360}{364}$, con N el día del año correspondiente (1 Enero = 1, por ejemplo).

Corrección de longitud

La zona horaria de un lugar se puede medir ya sea por un la longitud de un meridiano local (LL), cercano a la zona de medición, o por el meridiano estándar (SL) que lo relaciona al meridiano de Greenwich de longitud 0°. Debido a que el Sol toma 4 minutos en atravesar 1° de longitud, un término de corrección de longitud de 4x debe ser sumado o restado al AST dependiendo de si se está al este u oeste de la longitud 0°. Si se está al este se suma, si es opuesto se resta.

Con todo esto, la ecuación para calcular el tiempo solar aparente queda:

$$AST = LST + ET \pm 4 \cdot (SL - LL) \quad [min] \quad (2.2)$$

Si la locación medida está al este de Greenwich el signo es negativo, y si está al oeste es positivo. [5]

Este número sirve para calcular el ángulo horario del cual, junto con otros ángulos importantes, se hablará a continuación.

2.2.2. Ángulos solares

El sol, como es sabido, se mantiene fijo en el centro del sistema solar con respecto al resto de los planetas, de este modo, la rotación y traslación de cada uno de ellos genera los ciclos diarios y estaciones, entre otros fenómenos. Sin perjuicio de lo anterior, desde la superficie del planeta tierra es útil mantener la visión Ptolemaica (aquella que dicta que el Sol es el que se mueve y la Tierra se mantiene fija) para estudiar los movimientos del Sol sobre la esfera imaginaria de la atmósfera. De este estudio surgen diferentes ángulos que describen el movimiento aparente del Sol, de los cuales los más útiles para el análisis de la acumulación de energía solar serán expuestos a continuación [8][5].

Declinación δ

A medida que la Tierra se traslada al rededor de su órbita, esta rota sobre su propio eje en un periodo de 24 horas, dicho eje se encuentra inclinado en 23,45°. Ésta inclinación implica que el Sol, en su movimiento aparente, no describe en el cielo una curva que pasa justo sobre el eje este-oeste, sino que se inclina hacia el norte o sur, dependiendo de si se está en el hemisferio sur o norte de la Tierra, respectivamente.

El grado de esta inclinación varía a través del año, haciendo que la curva que describe el Sol se acerque o aleje del eje antes descrito; es esta variación, de hecho, la que genera las estaciones del

año. Como puede verse en la figura 2.4, dependiendo de la fecha del año en que se esté, la posición del Sol varía, por lo que los rayos solares que inciden sobre la Tierra llegan con un ángulo distinto. Se denomina declinación a la distancia angular de los rayos solares al norte (o sur) del ecuador. Por convención, las declinaciones al norte del ecuador se consideran positivas, mientras que al sur se consideran negativas.

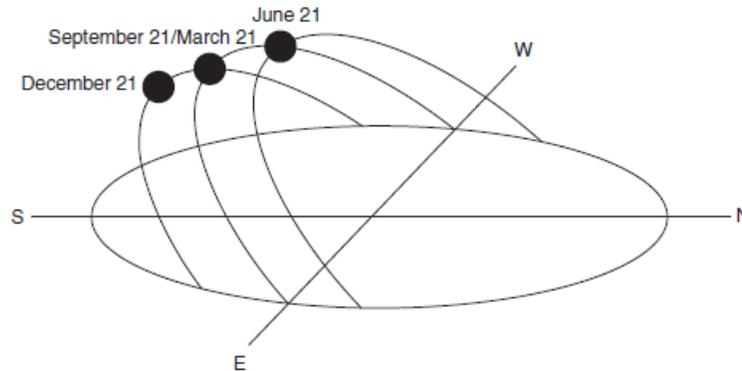


Figura 2.4: Variación del camino solar durante los días de un año en el hemisferio norte [5].

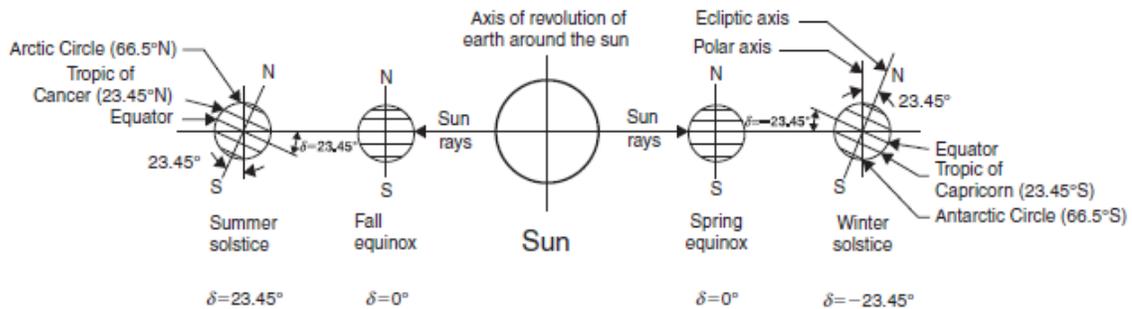


Figura 2.5: Variación anual de la declinación según descripción del hemisferio norte [5].

El grado de declinación en el hemisferio sur varía de $+23,45^\circ$ en el solsticio de invierno a $-23,45^\circ$ en el solsticio de verano; mientras se hace cero en los equinoccios de otoño y primavera. La figura 2.5 muestra cómo la declinación afecta la incidencia de los rayos de luz del Sol a través del año (considerando el hemisferio norte, por lo que los solsticios son opuestos), es así como conviene describir la evolución de la declinación en términos de los días (N):

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \cdot \frac{286 + N}{365} \right] \quad (2.3)$$

Ángulo horario ω_s

El ángulo horario está definido como aquel en el que la Tierra giraría para traer al meridiano del punto justo por debajo del Sol. Éste al mediodía local es cero, considerando cada movimiento de 15° equivalente a 1 hora. Las horas de la tarde se consideran positivas, mientras que las de la mañana se consideran negativas. Expresado de manera simbólica, el ángulo horario es:

$$\omega_s = \pm 0,25 \cdot (\text{Número de minutos desde el mediodía local}) \quad (2.4)$$

El ángulo horario puede obtenerse también a partir del AST; es decir, el horario solar corregido:

$$\omega_s = (AST - 12) \cdot 15 \quad (2.5)$$

Ángulo de altura solar α_s

Éste ángulo es aquel que se obtiene entre los rayos solares y el plano horizontal (no confundir con la declinación). Está relacionado con el ángulo zenit, θ_z , el cual describe el ángulo entre la vertical y los rayos solares, por tanto:

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (2.6)$$

La expresión matemática para el ángulo de altura solar es:

$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \quad (2.7)$$

Donde ϕ corresponde a la latitud local. Los valores al norte del ecuador son positivos, mientras que al sur negativos.

Varios de los ángulos mencionados anteriormente se pueden apreciar en la figura 2.6.

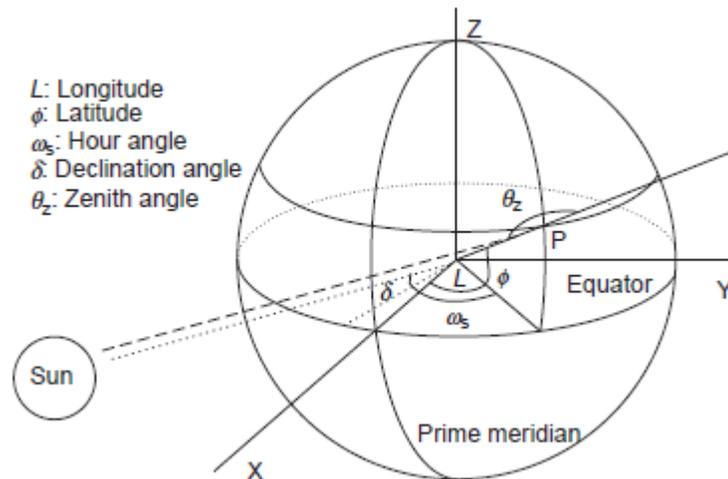


Figura 2.6: Ilustración de los ángulos solares en la esfera de la Tierra [8]

Ángulo azimut γ_s

Éste es aquel que se forma entre la proyección del Sol en el suelo y la línea que se forma al unir un punto específico del suelo con el eje norte (para el hemisferio sur). Hacia el este se designa como positivo en el hemisferio sur. La expresión matemática es la siguiente:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega_s}{\cos \alpha_s} \quad (2.8)$$

Ésta ecuación es correcta si $\cos \omega_s > \tan \delta \cdot \tan \phi$; ahora, si ese no es el caso, significa que el Sol está pasando por detrás del eje este-oeste, para esto, se decide imponer el valor para ese momento como $\pm\pi$, dependiendo de si es en la mañana o en la tarde.

Ángulo de incidencia θ

Se denomina ángulo de incidencia a aquel que se forma entre los rayos del Sol y la normal de una superficie cualquiera. Para un plano horizontal, el ángulo de incidencia y el ángulo zenit son el mismo. La figura 2.7 muestra una ilustración de éste ángulo sobre una superficie inclinada.

La siguiente expresión general determina este ángulo:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \phi \cdot \sin \delta \cdot \sin \beta - \cos \phi \cdot \sin \delta \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \\ & + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \cdot \cos \beta \\ & + \sin \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cdot \sin \omega_s \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde β = Inclinación de la superficie con respecto a la horizontal y γ = Ángulo de azimut de la superficie, desde el norte hacia el este es considerado positivo

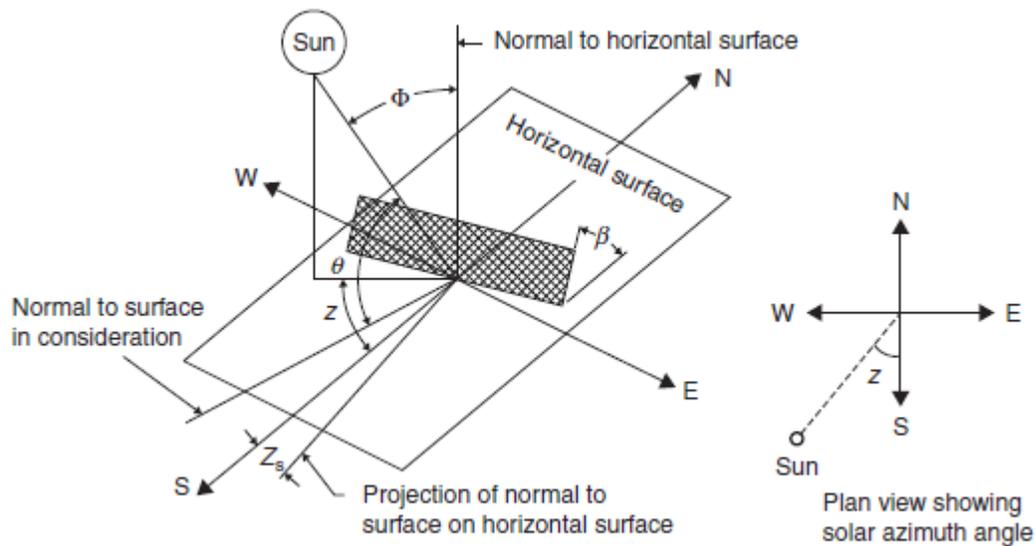


Figura 2.7: Diagrama de los ángulos solares sobre una superficie inclinada [5]. Aquí, Φ corresponde a θ_z ; z a γ_s y Z_s a γ

Para ciertos casos especiales, la ecuación 2.9 puede simplificarse. En este sentido, ya se explicó que para un $\beta = 0^\circ$, $\theta = \theta_z$, por lo que la ecuación 2.9 se reduce a la ecuación 2.7. Para el caso en que $\beta = 90^\circ$, la superficie está vertical con respecto a la superficie de la Tierra y la ecuación 2.9 queda:

$$\cos \theta = -\cos \phi \cdot \sin \delta \cdot \cos \gamma + \sin \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin \omega_s \cdot \sin \gamma \quad (2.10)$$

Para el caso de una superficie inclinada en el hemisferio sur mirando directamente al norte ($\gamma = 180^\circ$), la ecuación 2.9 queda:

$$\cos \theta = \sin(\phi + \beta) \cdot \sin \delta + \cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s \quad (2.11)$$

Como se puede ver, la ecuación para la incidencia varía bastante dependiendo del caso.

Para colectores solares muchas veces se instalan sistemas de seguimiento, los cuales varían éste ángulo a medida que pasa el tiempo. Así, dependiendo del tipo de seguimiento y la orientación del panel, la ecuación para el ángulo de incidencia puede variar aún más.

En esta sección no se ahondará sobre el cálculo del sistema de seguimiento, ya que si se determinase necesario instalar uno, se mostrarán los cálculos necesarios en el capítulo de Desarrollo.

2.2.3. Tiempos de amanecer y anochecer y duración del día

El Sol aparece y se esconde por el horizonte cuando $\alpha_s = 0^\circ$. Así, el ángulo solar en estos puntos puede encontrarse de la siguiente manera:

$$\sin 0 = 0 = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s (\alpha_s = 0) \quad (2.12)$$

o

$$\cos \omega_s (\alpha_s = 0) = -\frac{\sin \phi \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta} \quad (2.13)$$

Donde ω_s es positivo en la tarde.

Debido a que el ángulo solar en el mediodía es 0° y cada longitud de 15° que traversa el Sol es 1 hora, las horas de salida y puesta de Sol, en términos de hora local a partir del medio día son:

$$H_{ss} = -H_{sr} = \frac{1}{15 \cdot \cos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)} \quad (2.14)$$

El largo del día es el doble de la hora de puesta de Sol, ya que el mediodía está en el medio de la salida y puesta del Sol. Por lo tanto, el largo del día en horas es:

$$\text{Largo del día} = \frac{2}{15 \cdot \cos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)} \quad (2.15)$$

2.2.4. Radiación solar

La radiación proveniente del Sol entrega energía en un amplio espectro. Según la ley ampliamente conocida de Stefan-Boltzmann, la potencia entregada por todo el espectro de ondas de un cuerpo negro (cuerpo teórico que absorbe toda la luz que incide sobre él), está relacionada de ma-

nera directa con la cuarta potencia de la temperatura de tal cuerpo. El Sol por su parte, puede ser aproximado como un cuerpo negro a 5760 [°K] de temperatura, lo que entrega cerca de $60 \left[\frac{MW}{m^2} \right]$ de potencia, equivalente a $3,61 \times 10^{20}$ [MW] en toda la superficie solar. De esta, sólo una pequeña fracción de $1,7 \times 10^{14}$ [kW] llega a la superficie solar; no obstante, se estima que si se pudiese captar toda ésta energía incidente durante tan solo 84 minutos, se podrían cubrir las necesidades energéticas del mundo durante 1 año completo [5].

Ésta energía que incide sobre la Tierra debe pasar por variados filtros atmosféricos y meteorológicos que van mermando la cantidad efectiva que llega a la superficie de la Tierra. En la figura 2.8 se puede apreciar cómo la radiación solar extraterrestre es sometida a diferentes fenómenos que reducen su intensidad (absorción, reflexión y refracción). Finalmente, la radiación solar que llega al plano terrestre puede ser separada en dos tipos: directa y difusa. La primera es aquella que llega sin ser sometida a los fenómenos anteriormente mencionados, siendo por tanto mucho más intensa. Mientras que la segunda es aquella que incide en todas direcciones de la esfera celeste, siendo refractada en la atmósfera y absorbida por otros fenómenos; por ejemplo, en días nublados la única radiación disponible es la difusa.

Es a partir de ésta radiación que llega a la superficie que, dependiendo de la tecnología utilizada, se podrá aprovechar su energía para usos térmicos tales como calentar agua, procesos industriales que necesiten de temperaturas altas y, a mayor escala, producción de electricidad por ciclos de vapor.

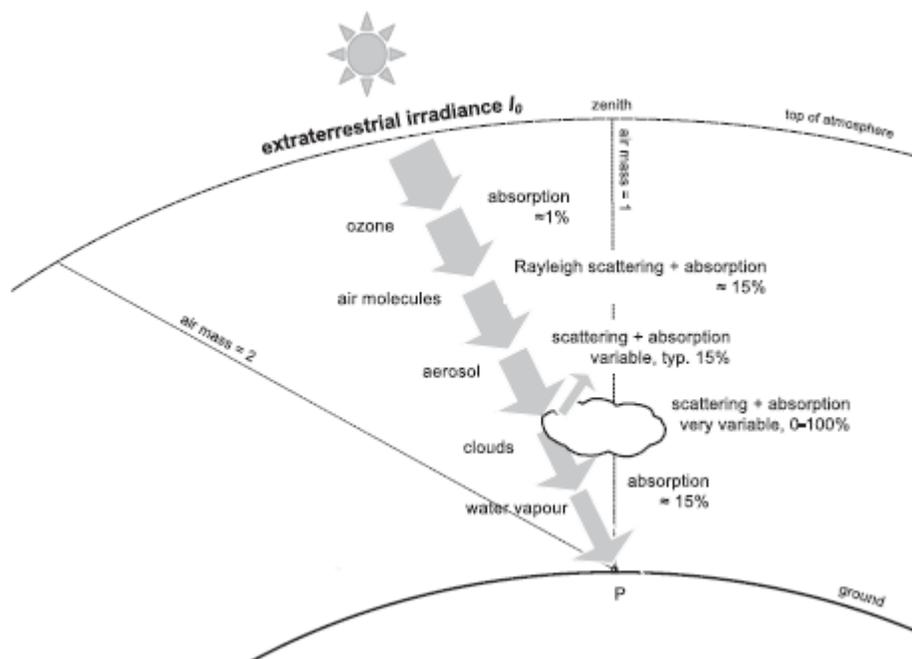


Figura 2.8: Ilustración de las pérdidas que sufre la radiación solar al entrar en la atmósfera terrestre [8].

Constante solar G_{sc}

Se le llama constante solar a la cantidad de energía solar por unidad de tiempo, a distancia media entre el sol y la tierra, recibida en una unidad de área normal a la superficie solar (perpendicular a la dirección de propagación) fuera de la atmósfera.

Este valor, al estar calculado para una distancia promedio entre la Tierra y el Sol, sufre cambios a medida que la Tierra se traslada por su órbita. Así, se establece la radiación extraterrestre para el N-ésimo día del año como:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot N}{365})] \quad (2.16)$$

Donde:

G_{on} = Radiación extraterrestre medida en el N-ésimo día del año. [$\frac{W}{m^2}$]

G_{sc} = Constante solar de valor 1366,1 [$\frac{W}{m^2}$]

Cuando una superficie es paralela al suelo, la cantidad de radiación G_{oH} , en este plano extraterrestre está dada por:

$$G_{oH} = G_{on} \cdot \cos \theta_z = G_{on} \cdot [\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \phi \cdot \sin \delta] \quad (2.17)$$

La cantidad total de radiación, H_0 , incidente en un plano horizontal extraterrestre durante un día se puede obtener integrando la ecuación 2.17 sobre el período de tiempo de salida y puesta de Sol:

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot N}{365})] \cdot [\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s(\alpha_s = 0) + \frac{\pi \cdot \omega_s(\alpha_s = 0)}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta] \quad (2.18)$$

Donde $\omega_s(\alpha_s = 0)$ corresponde a la hora de puesta de Sol en grados. Las unidades de la ecuación 2.18 son $\frac{J}{m^2}$.

Por último, para calcular la radiación extraterrestre en un plano horizontal de un período de tiempo en específico, se integra la ecuación 2.17 entre los horarios angulares h_1 y h_2 , con $h_2 > h_1$:

$$I_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot N}{365})] \cdot [\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot [\sin h_2 - \sin h_1] + \frac{\pi \cdot (h_2 - h_1)}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta] \quad (2.19)$$

2.3. Colectores Solares

Un colector solar es cualquier dispositivo que disponga de radiación solar con el objetivo de aumentar la temperatura de algún medio para su futuro aprovechamiento. Usualmente, la energía solar recolectada es utilizada para calentar fluidos como pueden ser agua, aceites térmicos o sales; a estos se les denomina fluidos de transferencia de calor o HTF por sus siglas en inglés.

Existen dos tipos de colectores solares, de captación regular y concentración. Los primeros se

caracterizan por mantener siempre la misma orientación, teniendo la capacidad de recolectar todo tipo de radiación solar, ya que captan diferentes ángulos de incidencia solar durante el transcurso del día. Por otro lado, los segundos deben hacer un seguimiento del Sol durante el día, concentrando la radiación directa que incide sobre ellos en un receptor central. Esto, les permite obtener un alto grado de energía, alcanzando temperaturas más altas. Cabe destacar que estos últimos sólo pueden captar radiación solar directa, por lo que su funcionamiento en días nublados es prácticamente nulo [5].

2.3.1. Colectores de captación regular

Como se explicó en el párrafo anterior, este tipo de colector es instalado con una dirección fija desde la cual capta diferentes intensidades de radiación solar, siendo la más alta aquella que se produce cuando los rayos caen de manera perpendicular a su superficie. Al encontrarse estos colectores en una dirección fija, permiten la captación de radiación de manera perpendicular solo durante un espacio pequeño del día, viendo afectada la recolección máxima posible y por ende, la temperatura de operación. Hay tres tipos de colectores que caen en esta categoría (las siglas se mantienen en inglés por facilidad de lectura):

1. Colector de placa plana (FPC)
2. Colector parabólico estacionario (CPC)
3. Colector de tubos evacuados (ETC)

Colector de placa plana

Los colectores de placa plana están constituidos por una placa de vidrio o plástico que cubre una caja metálica con fondo negro, dentro de ella pasan tubos que transportan el fluido a ser calentado, tal como se aprecia en la figura 2.9.a; basan su tecnología en el efecto invernadero. Usualmente, estos tubos están hechos de un material transparente que permite limitar las pérdidas de calor por el proceso. La temperatura que logran estos colectores es relativamente baja, aunque su simple tecnología permite bajos costos de capital para su implementación, rondando entre los 80 y 250 [USD/m²] [7]. Debido a la introducción de aislamientos con materiales altamente selectivos, los colectores de placa plana hoy en día pueden alcanzar temperaturas de estagnación cercanas a los 200 [°C], obteniendo buenas eficiencias en el rango de los 100 [°C] [5].

Colector parabólico estacionario

Un colector parabólico presenta una sección transversal parabólica, valga la redundancia, encargada de reflejar los rayos del Sol por medio de espejos a un punto específico, el tubo colector en este caso. Debido a que esta tecnología es estacionaria, el tubo colector debe ubicarse en la parte inferior de los espejos, los cuales por medio de orientaciones específicas permiten aprovechar la mayoría de los rayos, independientemente de su ángulo de incidencia. Además, se utiliza más de un tubo colector para maximizar el área de captación como puede verse en la figura 2.9.b, permitiendo alcanzar altas temperaturas [5].

Colector de tubos evacuados

Consiste en un tubo intercambiador de calor rodeado por un tubo de vacío; el principio de funcionamiento se aprecia en la figura 2.9.c. Debido a la presencia del vacío se logran minimizar las pérdidas térmicas con el exterior por conducción y convección. Al ubicar varios tubos en paralelo y conectarlos a un flujo de fluido térmico se puede construir un colector solar de alta eficiencia a altas temperaturas, usualmente 200 [°C], con la desventaja de un costo de capital mayor de 300 a 550 [USD/m²] [7].

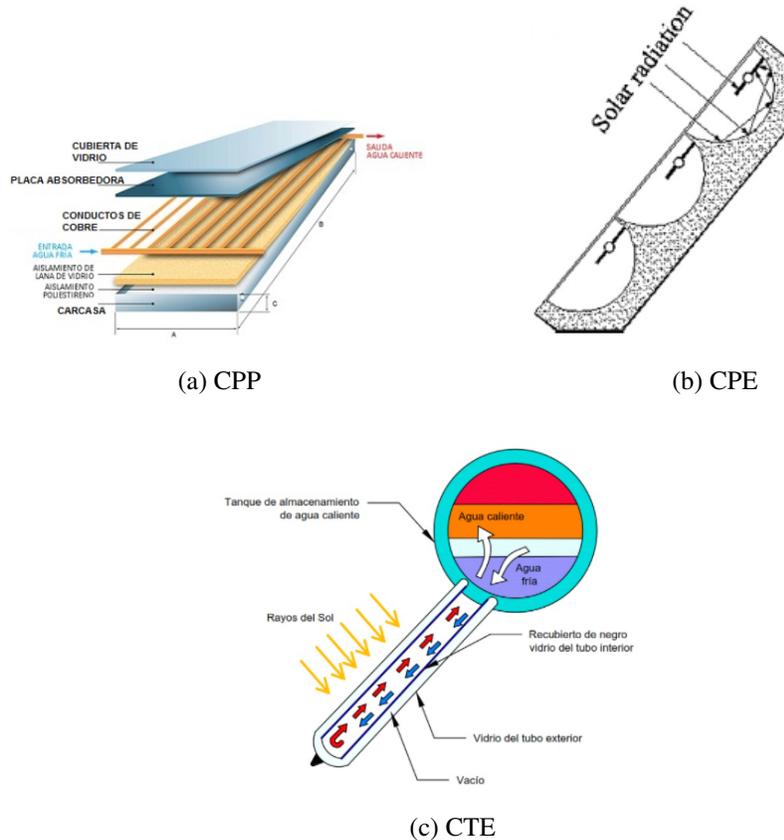


Figura 2.9: Colectores solares estacionarios [9]

2.3.2. Colectores de concentración

Este tipo de colector puede mantener un seguimiento, por medio de uno o dos ejes, al movimiento del Sol, maximizando su exposición a la radiación directa y llegando a temperaturas de operación bastante altas. Este nivel de captación depende de algo llamado factor de concentración, el cual relaciona el área de apertura con el área del receptor de la siguiente forma $C = A_a/A_r$, su valor mínimo es 1 y, mientras más grande sea, mayor es la concentración solar del equipo, ya que permite reflejar una mayor cantidad de energía sobre una superficie menor. Las temperaturas de operación a las que puede llegar este tipo de tecnología varía desde los 50 a los 1000 [°C] aproximadamente. Los tipos de colectores más conocidos en esta categoría son los siguientes:

1. Colector cilindro parabólico (PTC)
2. Colector tipo Fresnel Lineal(LF)

3. Colector de plato parabólico (PDR)
4. Campo de torre central (CST)

Se procederá a explicar solo las dos primeras tecnologías debido a su uso más amplio en procesos de desalinización.

Colector cilindro parabólico

Al igual que en los sistemas CPC, se cuenta con una sección transversal parabólica encargada de redirigir la radiación incidente, pero a diferencia del anterior, no se utilizan varios tubos recolectores, sino que se reemplaza este por un tubo ubicado en la distancia focal de los espejos. Debido a la capacidad de seguimiento de esta tecnología, se mantiene una radiación más o menos constante sobre el tubo a medida que pasa el día, logrando obtener temperaturas tan altas como 400 [°C] [5]. Los costos de capital, sin embargo, aumentan de manera significativa debido al sistema de seguimiento, la utilización de materiales más caros y los costos de manufactura de los espejos curvados. Aún así, este tipo de tecnología solar es la más utilizada en el mundo de la concentración solar para aplicaciones de alta temperatura [10].

En la figura 2.10 se puede apreciar un colector solar junto a la manera en que los rayos del Sol inciden sobre él.



Figura 2.10: Imagen de un colector solar cilindro parabólico [10].

Colector tipo Fresnel Lineal

Existen dos tipos de LF, los reflectores (LFR) y los colectores (LFC). El primero se muestra en la figura 2.11 y corresponde a una serie de espejos prácticamente rectos, ordenados uno al lado del otro con la capacidad de rotar sobre su eje longitudinal, que reflejan y concentran los rayos del Sol sobre un receptor central ubicado a cierta altura fija por sobre ellos. Con esto, se busca emular lo que sucede en un cilindro parabólico, sin la necesidad de utilizar un gran espejo curvo (el cual implica elevados costos de fabricación) ni mover el receptor (cuestión que acarrea penalidades termodinámicas).

El segundo corresponde a una configuración de lentes, usualmente plásticos, para disminuir los costos, que redireccionan los rayos a un recolector en él; esta tecnología se suele utilizar más en paneles fotovoltaicos que en recolección solar. La tecnología de reflectores suele alcanzar temperaturas bastante similares a los PTC a un costo considerablemente menor. Sin perjuicio de lo anterior, esta tecnología presenta problemas inherentes al diseño, como la generación de sombras entre placas consecutivas, lo cual, dependiendo de la orientación, puede tener implicancias como la necesidad de una mayor área de apertura [5].

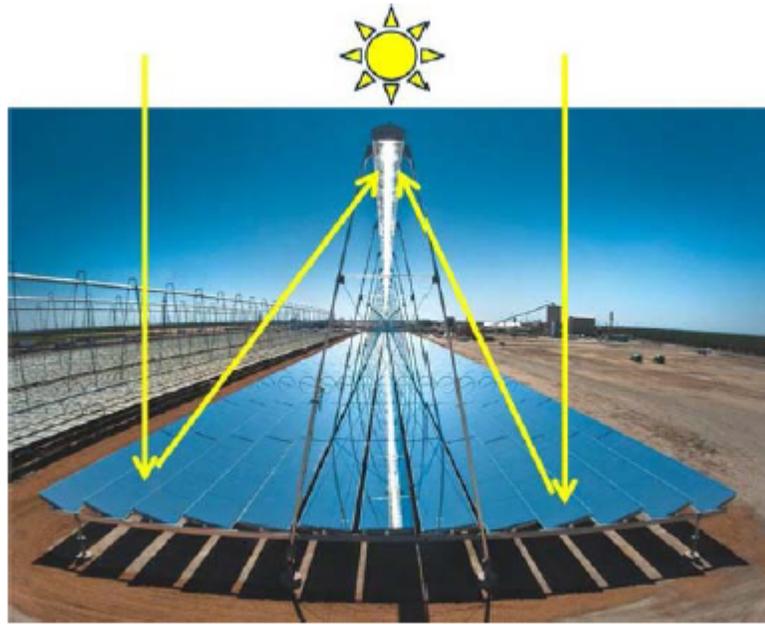


Figura 2.11: Imagen de un reflector tipo Fresnel Lineal [10].

2.4. Almacenamiento Térmico

Debido a la intermitencia del recurso solar, tanto por el ciclo diario como por las fluctuaciones causadas por el clima, se hace necesario introducir sistemas de almacenamiento térmico. Estos, son sistemas de componentes separados que interactúan con el sistema solar principal, y cuyo objetivo es cubrir los puntos en que la oferta energética no está disponible para cubrir la demanda.

Los sistemas de almacenamiento pueden ser cargados con la energía solar captada durante las horas de funcionamiento de la planta solar, o por sistemas auxiliares de energía (como lo pueden ser calderas de combustibles fósiles). Durante la descarga, el almacenamiento suplente parte o toda la oferta entregada por el sistema solar. En la figura 2.12 se pueden ver algunos de los usos del almacenamiento térmico en un ciclo diario. Algunas de las ventajas del almacenamiento térmico para sistemas de colectores solares son las siguientes [11]:

- La generación de electricidad se puede cambiar de períodos de baja demanda a períodos con alta demanda aumentando así la rentabilidad.
- Permite una eficiencia mejorada al evitar estados transientes y funcionamiento a carga parcial del ciclo de potencia debido a la irradiancia variable.

- Genera la reducción del número de puestas en marcha y, por lo tanto, una prolongada vida útil de los bloques de potencia.
- La capacidad de los sistemas de respaldo auxiliares necesarios para compensar el desajuste entre la disponibilidad y la demanda puede reducirse; los sistemas de respaldo por combustibles fósiles son optimizados para su uso por temas de flexibilidad, no eficiencia.
- Reducido tiempo de puesta en marcha al precalentar componentes.
- Reducción del estrés termomecánico en los componentes aguas abajo del almacenamiento como resultado de transitorios rápidos bajo insolación solar, lo que reduce el costo de mantenimiento y prolonga la esperanza de vida.

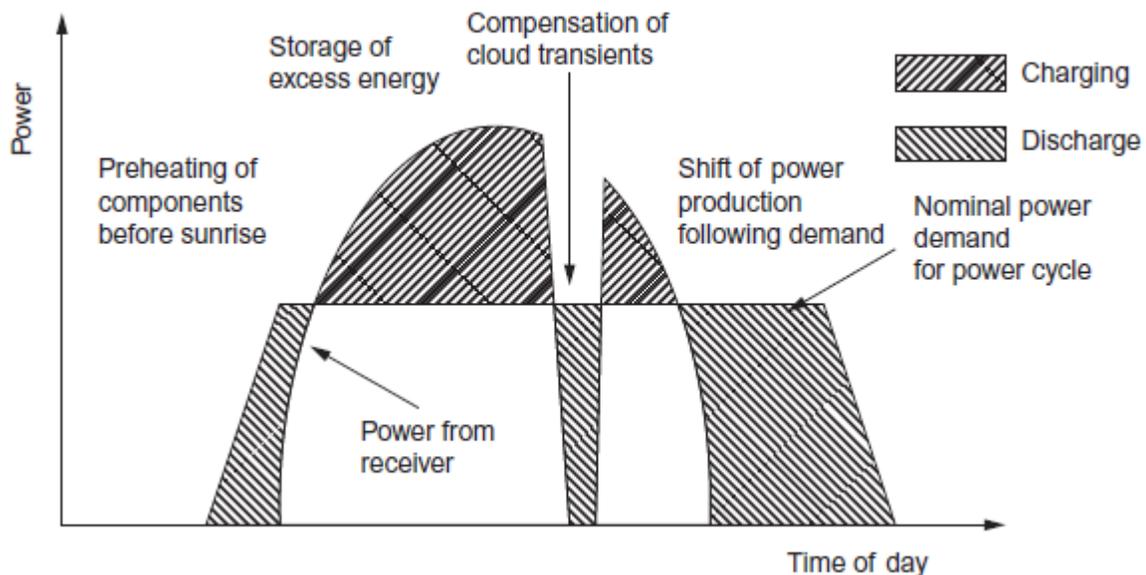


Figura 2.12: Algunas funciones del almacenamiento de manera gráfica [11].

Los sistemas de almacenamiento térmicos se utilizan hace bastantes años con capacidades pequeñas, rondando los $100 [kW h_{th}]$. No es hasta la introducción de los sistemas de concentración solar que se comienzan a tener almacenamientos de altas temperaturas y capacidades. Es más, hoy en día las temperaturas de operación de los sistemas están en el amplio rango de 120 a $1000 [^{\circ}C]$ [11].

Dependiendo de las características físicas del sistema de almacenamiento, estos pueden llegar a ser de grandes dimensiones. Por lo mismo, usualmente estos sistemas ocupan una fracción importante de los costos de capital de los proyectos solares. Así, es de gran importancia encontrar sistemas de altas capacidades térmicas que permitan reducir los costos de inversión. Ahora, la identificación de un buen sistema de almacenamiento para un caso particular depende de condiciones de borde específicas, como pueden ser el fluido de trabajo, el rango de temperaturas, la capacidad, la potencia y el tiempo de respuesta. Por tanto, dada la variabilidad de los límites, hoy en día se cuenta con muchos tipos diferentes de almacenamiento, los cuales pueden ser agrupados en tres categorías dependiendo del fenómeno termodinámico que los rige.

2.4.1. Calor sensible

En los sistemas de almacenamiento de energía por calor sensible, la energía a almacenar depende directamente de la variación de temperatura global del medio. La transferencia de energía está regida por la siguiente ecuación general:

$$\Delta Q_{12} = m \cdot \int_{T_1}^{T_2} c(T) \cdot dT \quad (2.20)$$

Donde m es la masa y $c(T)$ la capacidad de calor específica.

La capacidad de los sistemas de calor sensibles está limitada termodinámicamente por las temperaturas a las que trabaja y físicamente por la capacidad calórica del medio que almacena la energía.

Utilizando agua como ejemplo, la cual posee la capacidad calórica por masa más alta de todos los medios sólidos y líquidos, la máxima capacidad de almacenamiento para sistemas de calor sensible ronda los $0,11 \left[\frac{kWh_{th}}{kg} \right]$ para una diferencia de temperatura de $100 \text{ [}^\circ\text{K]}$. Comparado con las fuentes químicas (petróleo por ejemplo, $11,5 \left[\frac{kWh_{th}}{kg} \right]$), los sistemas de almacenamiento requieren de grandes masas [11].

Uno de los criterios importantes en que se agrupan los sistemas de almacenamiento térmico por calor sensible, es en razón del estado físico del material que almacena el calor, esto es, sólido o líquido. Además, se puede seguir subdividiendo las categorías por la manera en que transfieren calor, ya sea directa o indirectamente, es decir, por medio de un fluido caloportador intermedio o no. En la figura 2.13, puede verse un esquema explicativo de los principales conceptos utilizados en esta tecnología.

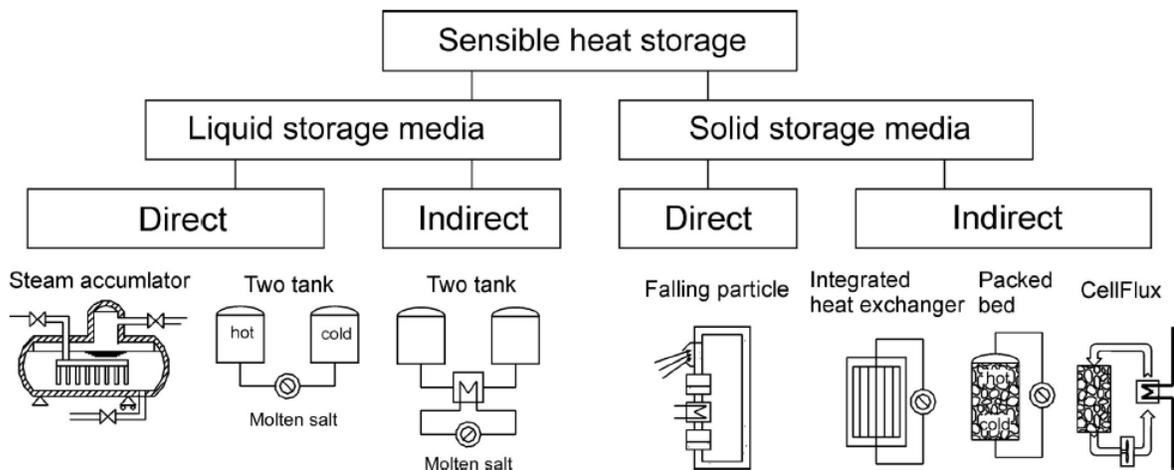


Figura 2.13: Esquema de tecnologías por calor sensible [11].

La elección de cada concepto dependerá de cada aplicación en particular, en la que deberán evaluarse las temperaturas y potencias a las que se quiere trabajar, las horas de almacenamiento, los flujos que se manejan, además de los costos que significa implementar tal tecnología.

2.4.2. Calor latente

Los sistemas de almacenamiento por calor latente emplean el cambio de entalpía de una sustancia que pasa a través de un cambio de fase (generalmente de sólido a líquido) para almacenar energía. La mayor ventaja de este tipo de sistema es que existe la opción de almacenar energía en un rango de temperaturas pequeño y cercano a la temperatura de cambio de fase del almacenador.

En sistemas CSP ha aumentado el interés por este tipo de almacenamiento para sistemas de generación directa de vapor, ya que con sistemas de almacenamiento sensible no suele ser rentable. Lo anterior debido a que la diferencia entre las presiones de carga y descarga para estos sistemas debe ser muy alta para lograr la transferencia de calor al material sensible.

Para desarrollar un sistema de almacenamiento por calor latente se necesita, primeramente, escoger un material de cambio de fase o *PCM* cuya temperatura corresponda con la temperatura de aplicación de la planta. Usualmente, esto significa que la temperatura de fusión del material esté cerca de la temperatura de saturación del flujo que interactúa con el almacenamiento (generalmente vapor). El material deberá efectuar cambios físicos y químicos reversibles, o lo que es lo mismo, sin generarse diferencias en las temperaturas de cambio de fase a través de muchos ciclos.

Los rangos de temperatura de los sistemas CSP que podrían funcionar con este tipo de concepto son de 120 a 340 [°C]. En la tabla 2.1 se muestran algunos materiales que podrían ser utilizados para este propósito. En ellos, los parámetros más importantes son el calor específico de fusión y la conductividad térmica.

Tabla 2.1: Características principales de algunos PCM [11].

| PCM | Temperatura de fusión [°C] | Densidad [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | Conductividad térmica [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$] | Calor de fusión [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$] | Calor latente específico en vol. [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$] | Costos del medio según capacidad [$\frac{\text{\$}}{\text{kWh}}$] |
|---|----------------------------|---|---|---|--|---|
| <i>KNO₃-NaNO₂-NaNO₃</i> (eu) | 142 | 2.000 | 0.5 | 60 | 33 | 65 |
| <i>KNO₃-NaNO₃</i> (eu) | 222 | 2.000 | 0.5 | 100 | 55 | 28 |
| Estaño | 232 | 7.200 | 60 | 59 | 118 | 600 |
| <i>LiNO₃</i> | 252 | 1.800 | 0.6 | 360 | 180 | 60 |
| <i>NaNO₃</i> | 306 | 1.900 | 0.5 | 175 | 96 | 14 |
| Plomo | 327 | 11.300 | 35 | 23 | 72 | 100 |

Mientras que el número de materiales parece ser abundante, solo una pequeña cantidad a lo grado ser desarrollado más allá de las pruebas de laboratorio para el rango relevante de operación en CSP. Muchos de ellos son, simplemente, incompatibles con el material de construcción o no son estables a largo plazo. Analizando la tabla, se puede descartar de manera directa el plomo y el estaño por costos. Ahora, en cuanto a los restantes, la conductividad térmica es el mayor problema ofreciendo una posibilidad muy limitada de almacenamiento [11].

Por lo general, este tipo de sistemas son más complejos que los sistemas sensibles y requieren de mayor investigación -en general- para lograr ser aplicados de manera rentable. Doerte Laing et. al. desarrolló en 2010 un sistema híbrido de tres fases con sistemas de almacenamiento sensible sólido y PCM. Utilizando concreto para las fases de precalentamiento y supercalentamiento (de hasta 500 [°C]) de vapor y *NaNO₃* como PCM para el almacenamiento intermedio. Descubrió que esta hibridación es prometedora para este tipo de plantas de generación directa de vapor, dando una ventana futura la aplicación comercial de esta, lo que bajaría los costos de producción considera-

blemente debido a los bajos costos de inversión [12].

2.4.3. Termoquímico reversible

Como su nombre lo dice, este tipo de sistemas aprovechan el cambio de entalpía generado por reacciones químicas reversibles para almacenar energía. El mayor interés en este tipo de sistemas es el hecho de que pueden almacenar energías a densidades mucho mayores que los dos conceptos anteriores. Además, los reactantes se pueden almacenar a temperatura ambiente, cuestión que los hace aún más atractivos.

Aunque este tipo de almacenamiento fue identificado muy tempranamente en el desarrollo de los sistemas CSP, se mantienen aún en etapas muy tempranas de desarrollo [11]. Esto se debe, principalmente, a problemas económicos y a aspectos del sistema que aún requieren de mayor investigación. A continuación se presenta un esquema que relaciona los tres sistemas vistos con respecto a su temperatura de operación, densidad energética y etapa de madurez.

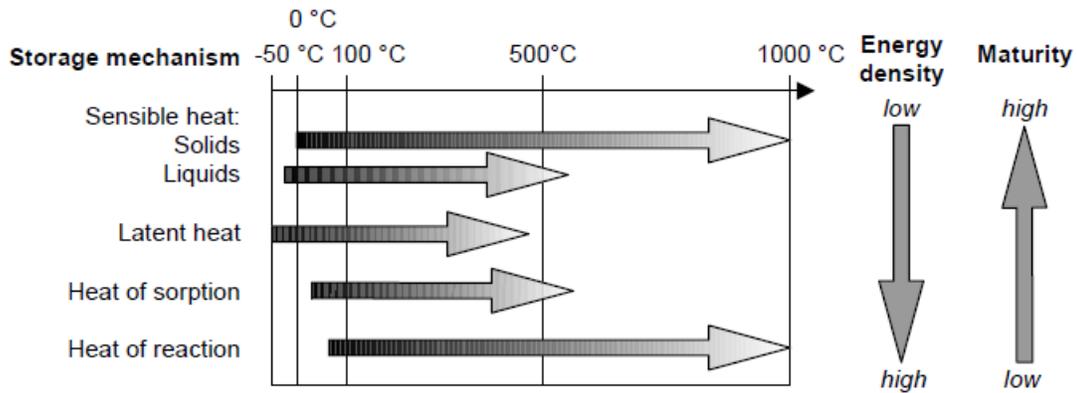


Figura 2.14: Comparación de los diferentes mecanismos de almacenamiento energético con respecto a diferentes parámetros [13].

2.5. Salar de Atacama

Ubicado en la Región de Antofagasta a 2400 msnm se encuentra el salar más grande de Chile, ubicado en el fondo de una cuenca endorreica con un área total aproximada de $15.620 [km^2]$, longitud máxima N-S de $210 [km]$ y longitud máxima E-O de $110 [km]$. Este presenta altas concentraciones en soluciones acuosas de Potasio (*K*), Magnesio (*Mg*), Boro (*B*) y Litio (*Li*), ubicadas principalmente en salmueras subterráneas y en algunas lagunas subsistentes en el mismo salar, correspondientes a cerca del 10% de la superficie total de la cuenca [14] [15].

Debido a su ubicación, la radiación horizontal en el salar escala entre un mínimo de $4,62 [kWh/m^2/dia]$ en el mes de junio, a un máximo de $9,36 [kWh/m^2/dia]$ en el mes de diciembre, presentando así un promedio de $7,14 [kWh/m^2/dia]$; una de las radiaciones más altas del mundo. Además, presenta promedios de vientos de $2,9 [\frac{m}{s}]$, temperatura promedio de $10 [^{\circ}C]$ y 6% de frecuencia de nubes, todo esto en una escala anual [16].

Los aportes hidrológicos superficiales del salar provienen, mayoritariamente, de cursos que drenan desde la Cordillera de los Andes al norte y al este del salar, siendo el río San Pedro el principal aporte; por otro lado, los aportes subterráneos provienen de la vertiente andina del salar y son los mayoritarios en proporción. Estos se producen por la infiltración de agua proveniente de las precipitaciones en el altiplano, gracias al denominado invierno altiplánico o Boliviano, la cual ronda entre los 50 y 100 [mm/año]. En cuanto a los componentes disueltos en las aguas del salar, debido a su origen común se infiere que el *K*, *Mg*, *B* y *Li* tienen un origen volcánico, ya sea por fluidos hidrotermales o alteración de rocas volcánicas [14].

La cuenca del Salar de Atacama posee sólo un área bajo protección oficial, perteneciente al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). Esta es la Reserva Nacional Los Flamencos, correspondiente al 1,3% del total de la cuenca, es decir, 20.806 [ha]. Además, cabe destacar que la cuenca no posee sitios de conservación de la biodiversidad [15].

La principal actividad económica de la zona corresponde a la minería, constituida por la explotación de litio, sodio, bórax y potasio. Las faenas mineras están ubicadas en el sector sur de la cuenca, en el denominado núcleo o llano del salar y, en el sector nororiente, se aproxima al poblado de Toconao. Si bien se sabe que esta es la actividad económica principal, no se puede indicar exactamente el área que utiliza en la zona debido a que, de acuerdo con los límites y escalas para las distintas macroregiones, se tiene que la mínima unidad cartografiada corresponde a 156,25 [ha]. Por ello, no es posible cartográficamente representar el uso del suelo minero [15].

Se estima, siguiendo una concentración de 0,15 [g/l], que las reservas de *Li* presentes en todo el Salar de Atacama podrían escalar a las 4.300.000 toneladas, haciéndolo el segundo salar con más recursos de este metal en el mundo, sólo detrás del Salar de Uyuni con 5.500.000 toneladas [17].

2.6. El Litio

2.6.1. Proceso de producción

Como se explicó de manera resumida en la sección de antecedentes generales, la producción de litio está ligada a dos procesos principales: la extracción por salmueras en salares y la producción a partir de rocas llamadas espodumenas ($LiAlSi_2O_6$). En esta sección, ambos procesos serán explicados, dando mayor énfasis a la extracción en salmueras.

Para poder caracterizar adecuadamente el proceso de producción por salmueras, es necesario explicar qué es una salmuera en este caso particular. Esta se podría clasificar siguiendo los lineamientos de la norma chilena NCh1333, la cual regula los requisitos de calidad de agua para diferentes usos. De acuerdo a esta norma, toda agua que supere los 5.000 [mg/l] TDS (sólidos totales disueltos, por sus siglas en inglés), no podrá ser utilizada para la irrigación de terrenos agrícolas. Lo anterior se justifica en razón de que el agua con tales niveles de salinidad podría perjudicar seriamente a los organismos vivos que la consumiesen. El agua de mar se considera cercana a los 35.000 [mg/l] TDS, mientras que la salmuera presente en el Salar de Atacama presenta niveles máximos que rondan los

251.000 [mg/l] TDS, haciéndola un agua extremadamente salina, de la cual se considera que cerca del 30% de su peso son sólidos en disolución tales como sodio, sulfatos, magnesio, calcio, litio, boro, entre otros [14]. Se denota, por tanto, la necesidad de trabajar con salmueras cuyos niveles de TDS sean lo suficientemente altos, proporcionando un nivel de salinidad que permita extraer cantidades importantes de litio en el proceso.

Para extraer el litio, la salmuera de alta salinidad es bombeada desde depósitos subterráneos ubicados a profundidades que varían desde los 1,5 a los 150 [m] a las piscinas superficiales de la primera etapa de evaporación, llamadas piscinas de halita. Una vez depositada la salmuera en esta primera piscina, comienza el largo proceso de evaporación y purificación por etapas; lo anterior, se hace con el objeto de facilitar la extracción de sales útiles y purificar la salmuera de subproductos indeseables. Dependiendo de las condiciones termodinámicas que presente la piscina en cuestión, se decide un tiempo determinado en que la salmuera debe ser trasladada a la piscina siguiente; así, el proceso puede durar desde 13 a 16 meses.

Una vez finalizado el proceso, se obtiene una solución final con un porcentaje de litio de aproximadamente 5 a 6% o 30 a 35% de cloruro de litio ($LiCl$). Esta solución es trasladada a la siguiente etapa del proceso en la cual es limpiada de los elementos considerados como impurezas, principalmente boro y magnesio. Luego, se mezcla la solución resultante con carbonato de sodio (Na_2CO_3), haciendo que carbonato de litio (Li_2CO_3) precipite como resultado. Este es luego, lavado, secado, compactado, tamizado y micronizado antes de empacarse. En la misma planta, a partir del carbonato de litio, y dependiendo de la producción que se necesite, puede producirse hidróxido de litio. La figura 2.15 muestra todo el proceso resumido de la extracción de litio por parte de la empresa SQM, además de mostrar el proceso asociado de producción de sales de potasio.

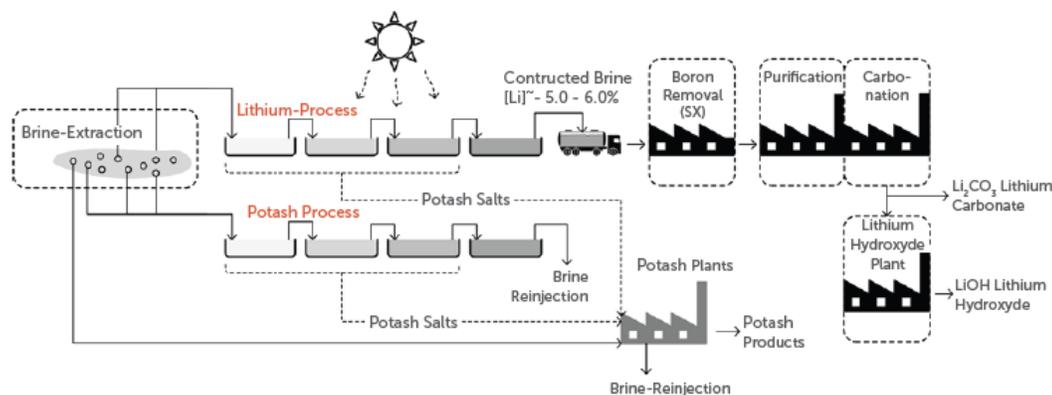


Figura 2.15: Proceso de extracción de sales de litio y potasio a través de salmueras [18]

SQM reporta tener una capacidad de producción de carbonato de litio de 70.000 [ton/año], además tiene una línea de producción de hidróxido de litio de 13.500 [ton/año]. Ahora bien, la empresa busca expandir estos niveles de producción a al rededor de 120.000 [ton/año] y 21.500 [ton/año] de carbonato de litio e hidróxido de litio respectivamente para el 2021, y tener 180.000 [ton/año] y 30.000 [ton/año] para el año 2023 [18].

Por otro lado, la extracción de litio por medio de espodumena se basa en la concentración de

litio a partir de la roca minada de manera tradicional; esta es molida, separada y limpiada para alcanzar una concentración aproximada de 2 a 3 % de litio. Luego, la roca resultante es calcinada a, aproximadamente, 1000 [°C] para obtener una solución de sulfatos de litio tras agregar ácido sulfúrico (H_2SO_4). A partir de aquí se pueden obtener los productos finales de carbonato de litio e hidróxido de litio al agregar agua en un proceso de lixiviación. La eliminación de impurezas es realizada transformando las mismas en hidróxidos al agregar hidróxido de sodio ($NaOH$), la solución resultante es luego limpiada usando un proceso de intercambio iónico, lo que permite concentrar las sales de litio que luego son comercializadas [18][1].

2.6.2. Cadena de valor

La cadena de valor del litio puede dividirse en 6 eslabones:

1. Materias primas
2. Fabricación de componentes
3. Fabricación de celdas
4. Baterías
5. Usos y producto final
6. Reciclaje de baterías

Cada uno de estos eslabones se caracteriza por presentar un alto grado de especialización. En consecuencia, la integración vertical de los procesos en la cadena es prácticamente nula, ofreciendo la oportunidad a grandes empresas con rubros específicos de generar oligopolios en cada parte del proceso de valor.

Los países que dominan la extracción de la materia prima de manera significativa son cuatro: Chile, Australia, Argentina y China. Sin embargo, los procesos siguientes están dominados por las grandes empresas tecnológicas asiáticas, además de unas pocas estadounidenses, capaces de participar en varios eslabones de la cadena de valor. El diagrama de la figura 2.16 muestra una ilustración simple de la cadena de valor del metal.

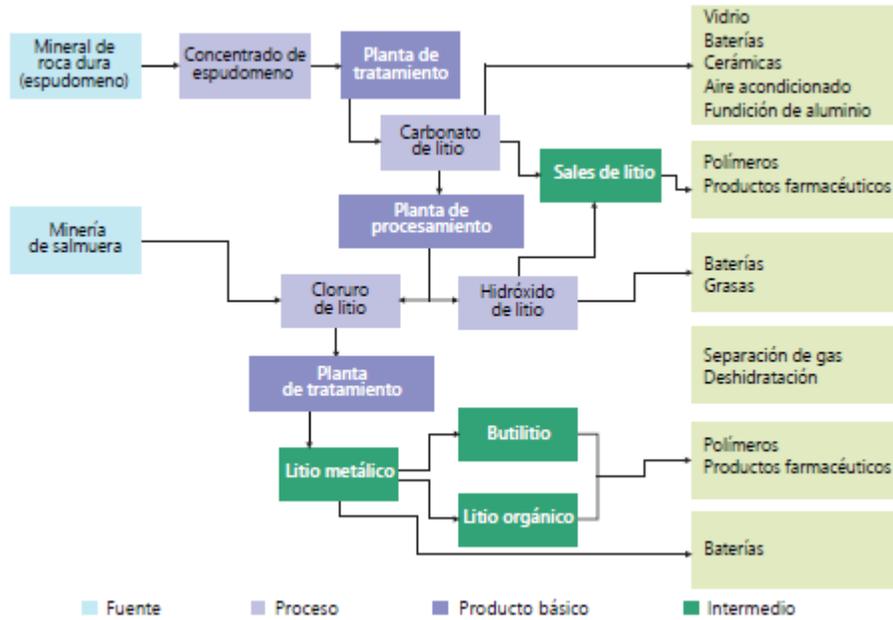


Figura 2.16: Cadena de valor del litio [19]

Debido a las características específicas de cada uno de los mercados, resulta muy difícil que un país, cuya producción se centra en uno de los eslabones, se expanda a otro de los mercados. Si Chile, por ejemplo, quisiera ser parte de la cadena de valor agregado, entraría a competir con las grandes empresas existentes en los países asiáticos, los cuales, por los niveles de producción que manejan, generarían la pronta bancarrota de cualquier empresa nueva que quisiera competir. Por tanto, para poder vencer estas barreras, no bastaría con la simple participación privada, sino que se deberá trabajar en conjunto con poderes estatales que permitan superar las brechas tecnológicas, cognitivas y productivas del mercado asiático [19].

Debido a la dificultad existente en cuanto a la integración vertical del mercado, el modelo de negocios más popular entre empresas de los distintos eslabones es la creación de alianzas estratégicas o *joint ventures*, permitiendo que las empresas tecnológicas y de extracción generen beneficios mutuos. Estos acuerdos comerciales han permitido asegurar niveles de rentabilidad y controlar la competitividad asociada a los mercados. Permitiendo, además, disminuir los impactos generados por las variaciones de precios y niveles de producción.

2.6.3. Recursos, reservas y oferta

Chile es el país con mayores reservas de litio en el mundo, es decir, aquel que tiene un cierto interés económico y posee la tecnología suficiente para ser explotado y comercializado. En cuanto a las reservas, el país posee una gran ventaja frente a otros países productores del mineral alcanzando un 48% de las reservas de todo el mundo, seguido por Australia y Argentina con un 17% y 13% respectivamente. Aún así, si se consideran todos los recursos de litio disponibles en el mundo, Chile se posiciona en el tercer lugar con un 16%, precedido por Argentina y Bolivia con 18% y 17% respectivamente [20]. Ambas ilustraciones pueden verse de manera gráfica en la figura 2.17.

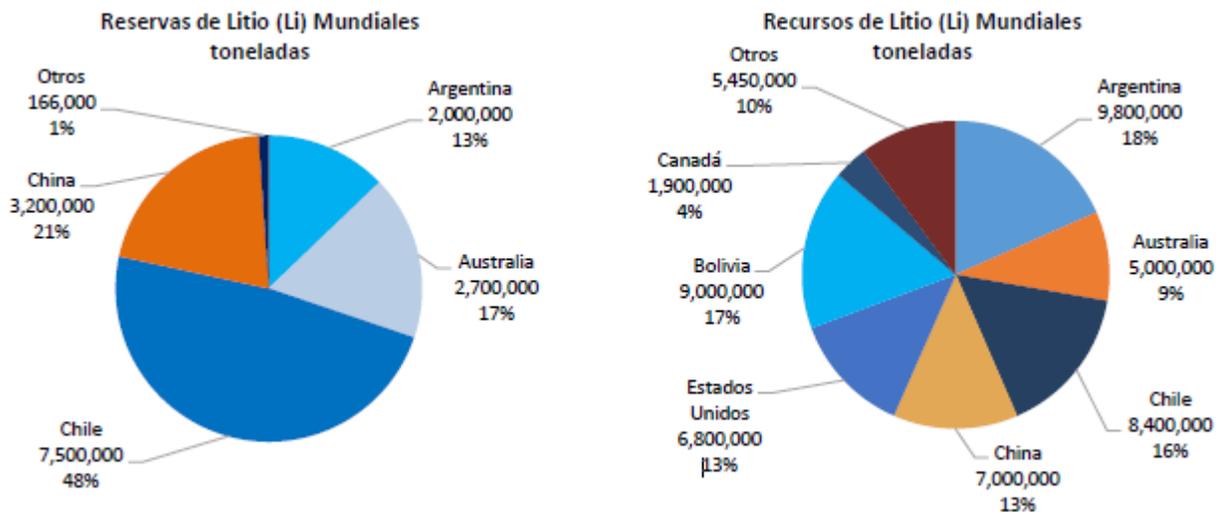


Figura 2.17: Recursos y reservas de litio en el mundo [20]

Con este contraste se puede apreciar cómo Chile es, por un margen considerable, el mercado más desarrollado de litio en todo el mundo. Si bien existen países con mayor cantidad de recursos de litio disponibles, es claro que no se están explotando a su máximo potencial, mientras que Chile se caracteriza por acceder a sus recursos de manera mucho más amplia, otorgándole un mejor posicionamiento. Las razones para esto son variadas, desde baja estabilidad nacional en ciertos países a altas concentraciones de impurezas, tales como el magnesio, que no permiten extraer el litio de manera rentable en la actualidad. Además, también resulta relevante considerar que la extracción de litio desde fuentes minerales implica un mayor costo que la extracción desde salmueras. Aún así, se debe tener en cuenta que avances en la tecnología podrían poner en acción proyectos en zonas de baja explotación, disminuyendo así el porcentaje preferente de reservas que posee Chile.

En cuanto a la oferta de litio, esta puede ser desglosada de varias maneras. Al año 2017, el 60% del litio fue producido por extracción directa desde salares, mientras que el restante fue extraído por minería en roca. Esto se debe, principalmente, a los bajos costos variables que significa la minería de salmueras, ya que no son necesarias grandes faenas mineras o altos consumos de energía por medio de combustibles fósiles.

Se prevé que la oferta de este metal crezca en los años venideros debido al aumento de la demanda. En consecuencia, los principales países que aportarán al aumento de esta oferta serán Australia, Chile, Argentina y, en menor medida, otros países como Brasil y Canadá. Esto responde a que los mayores productores de litio en el mundo operan dentro de estas naciones; Talison (Australia), Mineral Resources (Australia), Galaxy (Australia), SQM (Chile), Albemarle (Chile) y Livent (Argentina) [20].

En el panorama nacional, la producción de litio en Chile está dirigida exclusivamente por las dos empresas que operan en el Salar de Atacama (SQM y Albergale). La mayor parte de la producción se centra en obtener Li_2CO_3 (cerca del 90%), aunque se espera que este porcentaje disminuya en el futuro debido al aumento esperado de demanda por $LiOH$. Además, se prevé que la oferta de litio entregada por Chile se triplique para el año 2022 llegando a 240.000 toneladas, debido a los nuevos proyectos en desarrollo por parte de estas dos empresas.

Los costos de producción del carbonato de litio en base a salmuera fluctúan entre los 4.000 [$\$/ton$] y los 5.000 [$\$/ton$]. Además, se debe pagar un número importante de regalías a la CORFO según el nivel de precios a los que se vendieron los minerales. En la tabla 2.2 se pueden ver ilustradas estas comisiones con datos extraídos directamente de CORFO.

Tabla 2.2: Tasas de comisión según precio de carbonato de litio. Fuente: CORFO

| [\$US/ton] | Tasa Comisión Progresiva [%] |
|---------------|------------------------------|
| 0 a 4.000 | 6,8 |
| 4.000 a 5.000 | 8,0 |
| 5.000 a 6.000 | 10,0 |
| 6.000 a 7.000 | 17,0 |
| 7.000 a 10.00 | 25,0 |
| >10.000 | 40,0 |

Por último, es bueno señalar que los costos de la producción de litio varían bastante dependiendo si se trata de salmuera o yacimientos minerales. Un desglose general de la distribución de costos puede verse en la figura 2.18.

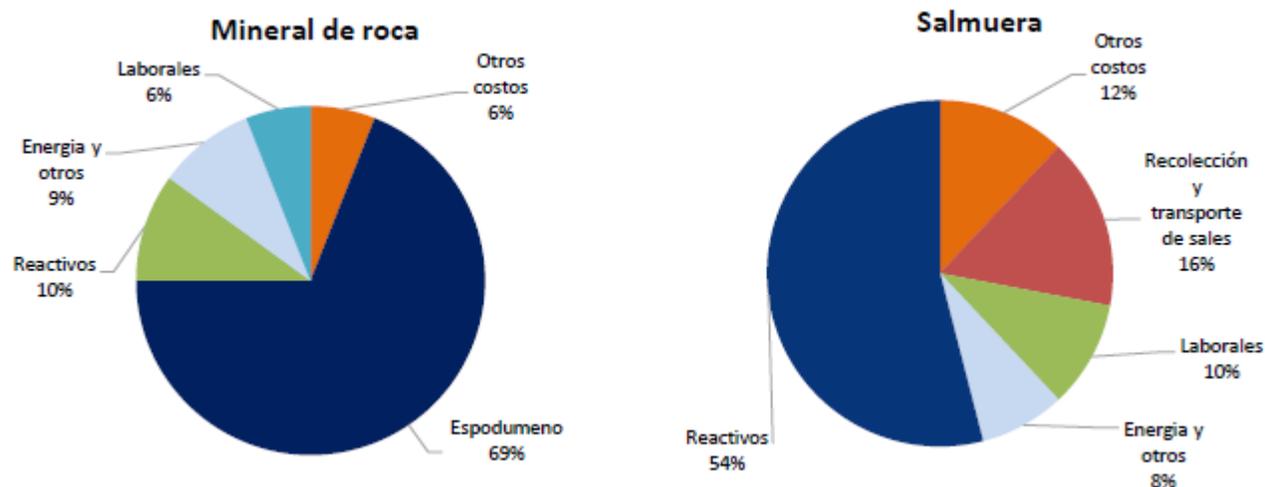


Figura 2.18: Desglose general de costos de producir compuestos de Li según tipo de producción [20]

2.6.4. Precio

El litio es una de las materias primas que mayor aumento ha presentado en su precio en las últimas décadas. Lo anterior tiene por causa el crecimiento de la demanda por baterías recargables en el mundo; en este sentido, es natural que la valoración del metal haya subido. Entre 1999 y 2008 el precio promedio del carbonato de litio subió un 222%, significando un crecimiento anual de 13,9%. Luego de este periodo, el precio experimentó niveles de estancamiento importantes hasta el año 2015, aproximadamente, en el cual el auge de la electromovilidad significó una reactivación del interés en el metal, llevando su precio de 5.800 [$\$/ton$] en 2015 a 13.700 [$\$/ton$] en 2017;

en promedio [19].

Ahora bien, el precio de los productos de litio presentó una tendencia bajista hacia mediados del 2019, situándose 9.500 [US\$/ton] en promedio después de haber alcanzado su peak histórico a principios de 2018 con 22.900 [US\$/ton] [19]. La razón de esta tendencia se puede explicar por la mayor expectativa de oferta en los próximos años debido a la entrada de nuevos proyectos, señales de ralentización de la economía China y la guerra comercial entre Estados Unidos y el gigante asiático. Aún así, la demanda se mantiene creciendo y existe espacio para que los productores puedan moderar la ejecución de nuevas iniciativas, principalmente expansiones de empresas ya operando, lo cual podría ser un factor que limite una caída en el precio [20]. En vista de lo anterior, se espera que el valor del litio se regularice y vuelva a los precios del año 2015, alcanzando promedios entre 5.000 y 7.000 [US\$/ton] una vez que se reajuste la oferta y la demanda; esto se prevé que sucederá entre los años 2022 y 2023. La figura 2.19 muestra de manera gráfica la variación del precio del litio en los últimos 10 años.

Aún así, el litio, a diferencia de otras materias primas, es un recurso que tiene prohibida su transacción pública en la bolsa de valores, lo que disminuye la transparencia en cuanto a su precio real. Sumado a esto, la variedad en los recursos que contienen este metal es tal que la estandarización de la extracción del mismo es complicada, perjudicando por ende la estandarización del precio; por tanto, cada precio es definido por los productores y compradores de manera individual.

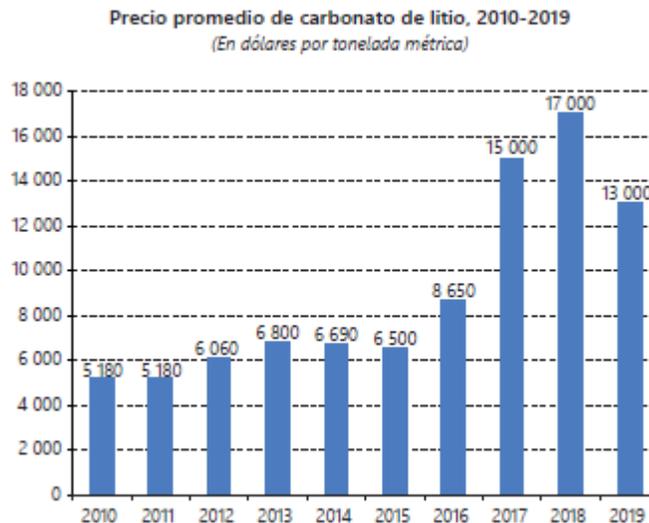


Figura 2.19: Evolución del precio del litio en el mundo [19]

2.6.5. Demanda y mercados solicitantes

El litio presenta propiedades que lo hacen atractivo para diferentes usos: es el sólido más liviano de la tabla periódica, posee una alta potencia electroquímica, baja expansión térmica y viscosidad, además de particularidades fundentes y catalíticas. En el último tiempo, el uso principal del elemento ha ido en incremento hacia la producción de baterías para distintos fines. Esto se explica debido al cambio en el paradigma mundial, el cual ha implicado la necesidad de dispositivos de almacenamiento eléctrico para diferentes mercados; desde los teléfonos móviles a la producción de

energía. Ahora bien, su uso en mercados secundarios como fabricación de vidrio y cerámica, grasas lubricantes, colada continua del acero y aire acondicionado siguen siendo relevantes. Se puede apreciar esta variación en el uso del litio en la figura 2.20.

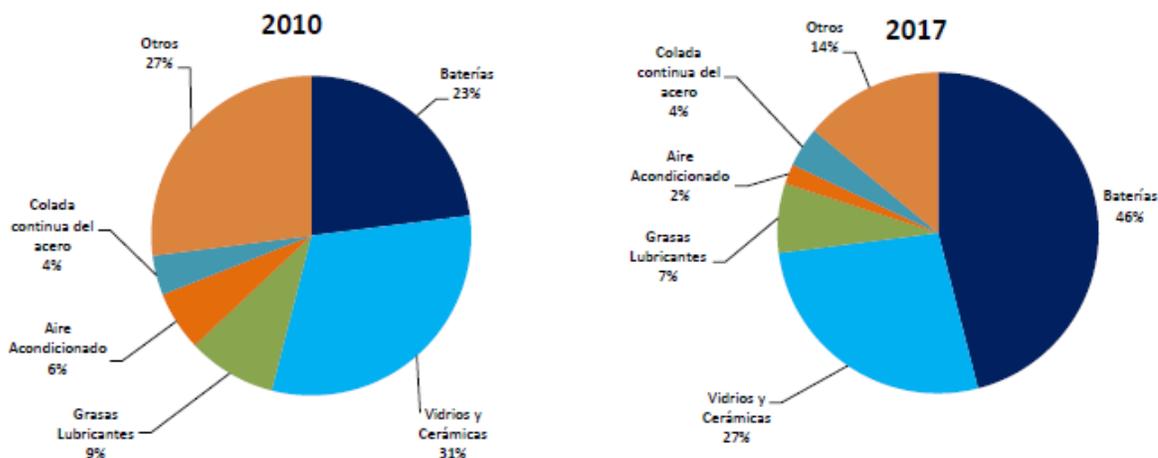


Figura 2.20: Porcentaje de uso del mineral de litio en 2010 y 2017 [20]

El aumento en rendimiento y seguridad de las baterías Ion-Litio, ha permitido un consecuente aumento en la demanda del mineral. Inicialmente se estimaba que la demanda aumentaría debido al uso de baterías en dispositivos electrónicos y, si bien en el último tiempo se ha percibido una demanda mayor en esto, se prevé un uso aún mas alto hacia el futuro debido al desarrollo de grandes sistemas de almacenamiento energético, tanto para uso domiciliario como industrial.

Además, la irrupción de los mercados de automóviles eléctricos e híbridos ha traído un renovado interés por baterías de alto rendimiento y durabilidad; en ese sentido, las baterías de Ion-Litio son las únicas que actualmente pueden suplir ese requerimiento, ya que poseen una alta densidad energética, bajo efecto de autodescarga y mayor voltaje que las baterías tradicionales. Como resultado de lo anterior, y considerando las altas tasas de crecimiento anual de esta nueva industria, nuevas restricciones hacia sus contrapartes fósiles y, en general, el cambio de mentalidad en el mundo hacia las economías denominadas "verdes", se espera que el crecimiento compuesto ya mostrado en estos años siga subiendo, disminuyendo el costo de producción del litio en su camino. La tabla 2.3, muestra la proyección (al 2018) de la demanda de litio según el área productiva.

Tabla 2.3: Tasa de crecimiento anual de demanda del litio según área productiva [20]

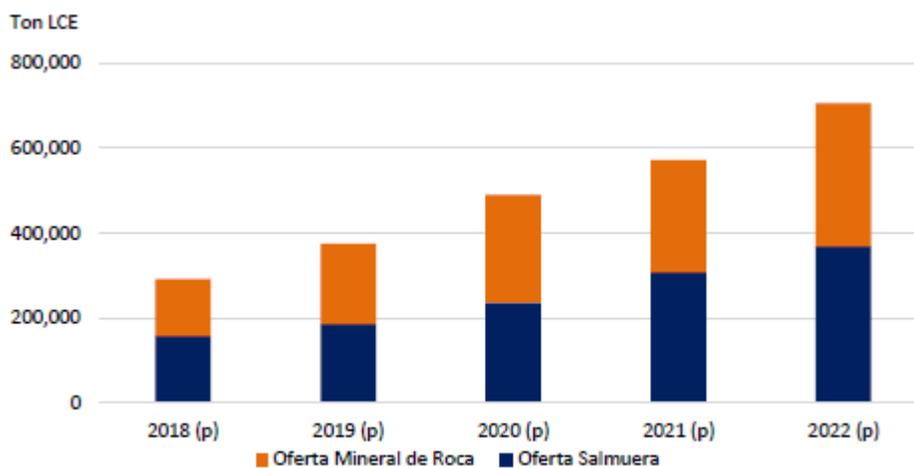
| Área | Tasa de Crecimiento (2016-2021) [%] |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Transporte | 32-35 |
| Artículos de consumo electrónico | 8 |
| Sistemas de almacenamiento de energía | >40 |

2.6.6. Proyecciones de oferta y demanda

Proyección de la oferta mundial

La unidad de medida que permite estandarizar la producción de litio a nivel mundial es la denominada LCE, cuyas siglas en inglés representan el carbonato de litio equivalente que se ha producido. Dejando esto claro, según COCHILCO, al 2018 se esperaba que la oferta mundial alcanzaría las 280.200 toneladas de LCE, aumentando a un 26% anual hasta llegar a 705.000 toneladas de LCE el 2022. Este crecimiento estaría impulsado, principalmente, por el aumento de la explotación en yacimientos de minerales y posterior procesamiento de los mismos, principalmente en Australia. Dado lo anterior, la oferta por medio de salmueras vería un crecimiento de 147.000 toneladas de LCE el 2018 a 368.000 toneladas en el año 2022, impulsada por Chile en su mayor parte [20].

Algo que podría frenar el aumento de la oferta por parte de los yacimientos, es la falta de plantas de procesamiento de minerales que puedan transformar las rocas extraídas en LCE utilizable. Si bien al 2022 se espera que la oferta de LCE provenientes de este tipo de extracción aumente a 497.905 toneladas, la capacidad de procesamiento para ese año alcanzaría solo un total de 337.000 toneladas, disminuyendo por ende la oferta proyectada final [20].



Fuente: Elaborado por Cochilco en base a Canaccord Genuity

Figura 2.21: Proyección de oferta de LCE según el estudio citado [20]

Proyección de la demanda mundial

El año 2017 la demanda alcanzó un total de 221.000 toneladas de LCE, sin embargo, debido al aumento de la producción de medios de transporte eléctricos e híbridos, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía, se proyecta que para el 2022 la demanda habrá aumentado a 505.000 toneladas, de acuerdo a las proyecciones de COCHILCO. Este nivel de demanda, según la proyección de oferta vista en la sección anterior, podrá ser cubierta en su totalidad [20].

La proyección de la demanda se sitúa en un 16% anual, generando un superávit en el mercado estudiado, lo que afectaría el precio final de la materia prima. La mayor parte de esta demanda

estaría situada en el mercado del transporte, superando con creces a las demandas que podrían presentar los dispositivos electrónicos y sectores industriales. En la figura 2.22, se puede apreciar cómo el sector de transporte presentaría una tasa de crecimiento anual de la demanda de 34 %, mientras que los sectores de aplicaciones industriales y de baterías para dispositivos electrónicos evidenciarían crecimientos moderados, de 3 % y 5 %, respectivamente.

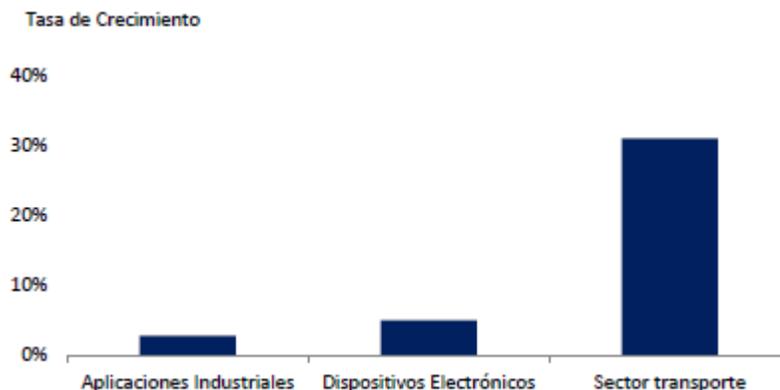


Figura 2.22: Tasa de crecimiento anual de la demanda de litio según sector productivo [20]

2.6.7. Impacto ambiental y social

La extracción de litio, independiente del método utilizado, acarrea ciertos impactos socioambientales relacionados a la misma. Por lo tanto, es importante poder medir la magnitud de estos, indicando si son debidamente mitigados o si están afectando el ecosistema (y a la sociedad que convive en ellos) al corto, mediano y largo plazo. A continuación se presentan diferentes estudios realizados por entes independientes, así como las empresas que operan en la zona.

Declaraciones ambientales de SQM

La empresa SQM declara en su página web que durante los 25 años en que ha operado en el salar, el nivel de salmuera ha disminuido entre 0,5 y 5 [m] pero que, sin embargo, los niveles de agua dulce en los ecosistemas solo han demostrado una variación de ± 10 [cm]; esta declaración da a entender que no existe una relación directa entre los niveles de agua dulce subterránea y su contraparte salina. Declaran, además, que el permiso de la autoridad ambiental les permite extraer 1.600 [l/s] de salmuera, y que, de acuerdo con la evaluación del ente regulatorio, la actividad bajo estas condiciones no debería generar ningún impacto significativo.

Declaran que generan un mínimo impacto ambiental, exponiendo que el proceso de extracción de litio implica que las impurezas devueltas al salar son los mismos elementos que ya estaban en la cuenca. Además, indican que no existen productos químicos involucrados en ningún punto del proceso de extracción y que las sales precipitadas se utilizan para otros procesos, como lo es la producción de potasa; otras sales como el $NaCl$ o el $MgCl_2$, aunque comercializables a baja escala, se mantienen en el salar.

Con respecto al procesamiento de la salmuera obtenida en el salar, la empresa declara que los desechos producidos son sales y salmueras que contienen principalmente carbonato, calcio, magnesio

y pequeñas cantidades de litio que se almacenan en la planta.

Por último, mantienen ciertas metas medioambientales a futuro entre las que destacan: (i) la disminución de extracción de salmuera a un 50 % del actual para el 2030, (ii) la reducción del agua continental utilizada a 40 % menos al 2030 y 65 % al 2040 y (iii) ser una empresa carbono neutral para el año 2040 [18].

Estudios independientes

Se sabe que durante el proceso de extracción, cerca del 95 % de la salmuera extraída es evaporada para lograr las concentraciones necesarias antes de procesar el producto. Además de esto, entre la empresa SQM y Albermale extraen cerca de 1.600 y 2.000 [l/s] de salmuera desde diferentes profundidades. De acuerdo a un estudio de modelos hidrogeológicos realizado por el comité de energía no metálica de la CORFO, existe un desbalance serio entre las entradas y salidas de agua del salar cada año (entre 1.750 y 1.950 [l/s]), motivado principalmente por las extracciones antrópicas de la salmuera del salar [21]. En las figuras 2.23 y 2.24 se puede apreciar la diferencia gráfica de entradas y salidas de flujos hidrológicos del Salar de Atacama en régimen natural y de explotación, respectivamente.

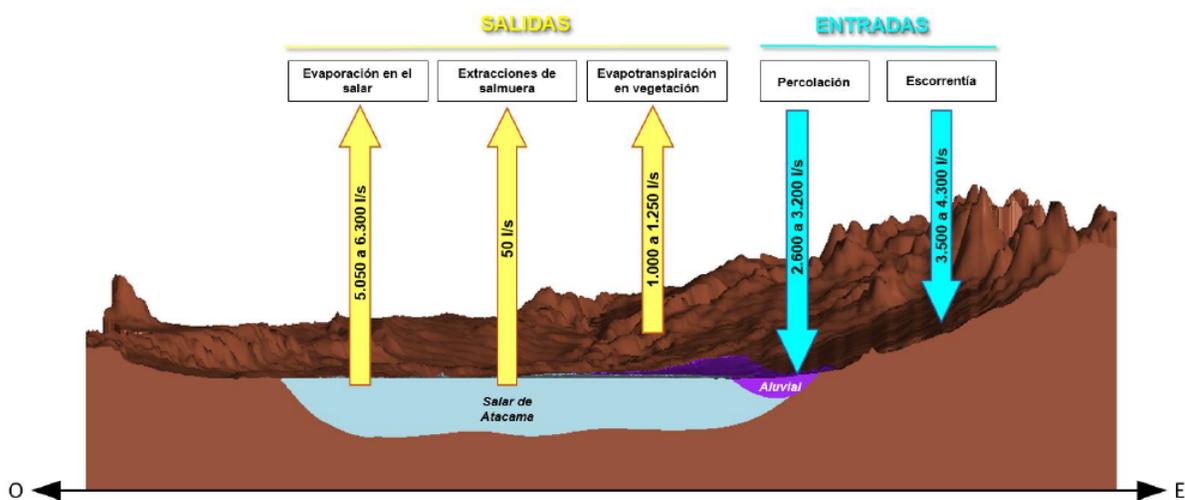


Figura 2.23: Balance hidrológico sin explotación (años 80) [21]

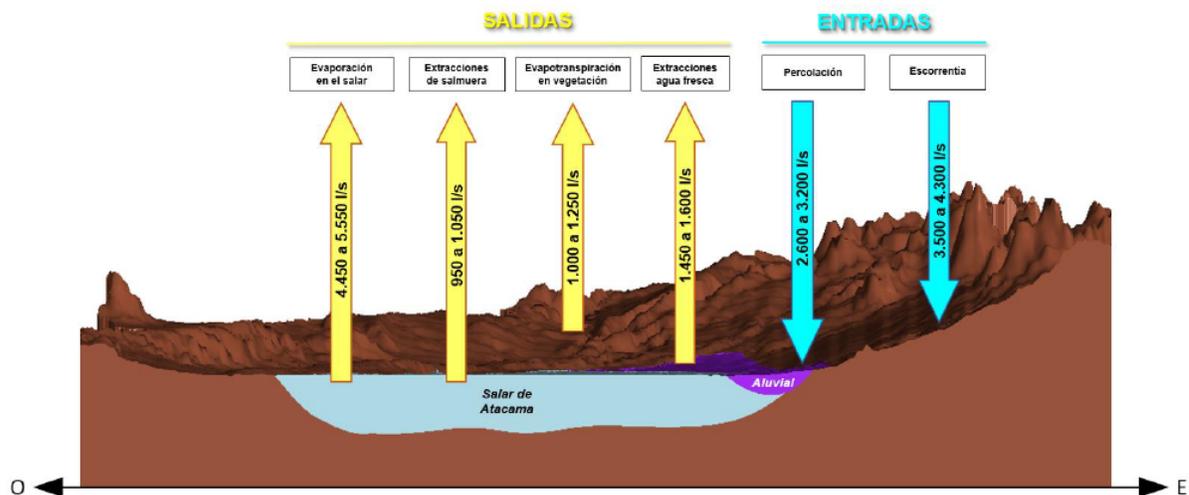


Figura 2.24: Balance hidrológico con explotación (promedio entre 2000 y 2015) [21]

Además de esto, un paper realizado por la Universidad de Arizona indica que, junto con el aumento rápido de las operaciones mineras en el salar (cerca de 7,07% anual en promedio), se ha mostrado una degradación significativa de las zonas aledañas al mismo. Entre los factores estudiados destacan principalmente los siguientes: disminución de la vegetación, temperaturas diarias más elevadas, disminución en la humedad de la tierra y aumento en las condiciones de sequía en la reserva Los Flamencos.

La conclusión del mismo es que las actividades mineras son uno de los mayores provocadores del deterioro del ecosistema local, mostrando una clara correlación entre ambos eventos. Se indica que el 26,7% del área total del salar ha presentado suelos más secos, lo que se refuerza con el éxodo de agricultores de la zona debido a las constantes fallas de sus plantaciones por la falta de agua. Se reportó además, por parte de la Superintendencia del Medioambiente (SMA), la muerte de al menos 23 individuos de Algarrobos -árboles extremófilos con raíces muy profundas que le permiten captar agua desde grandes profundidades- aumentando así las sospechas de la disminución del acuífero en general. Finalmente, se sugiere que el aumento explosivo de la industria turística y el aumento de la población también podrían ser relevantes, aunque se necesitarán mayores estudios para aseverar eso de manera fehaciente [22].

Disputas legales

En los últimos años, variadas disputas legales se han presentado en contra de las empresas SQM y Albergale por fallar en el cumplimiento de las exigencias ambientales impuestas por el SEA, e incurrir en violaciones de los límites presentados por la CORFO para el funcionamiento de las faenas.

El año 2018, siguiendo el informe de la CORFO expuesto en la sección anterior [21] se presentó un alegato a la SMA indicando el desbalance encontrado en el salar, sugiriendo que SQM estaba extrayendo más salmuera de la que su contrato le permitiría. La dirección nacional de aguas fue informada al respecto y se estableció una limitación sobre la extracción de salmuera por medio de la presentación de una medida precautoria [23].

En 2017 Eduardo Bitrán, vicepresidente ejecutivo de la CORFO, inició un procedimiento sancionatorio administrativo en contra de SQM por no disminuir el nivel de bombeo en el salar cuando se le indicó expresamente que lo hiciera buscando restablecer los balances del acuífero. Indicando que *estas infracciones de SQM Salar S.A. que ponen en severo riesgo la estabilidad del ecosistema del Salar de Atacama, de sus salmueras, y de las reservas, constituyen también graves incumplimientos de sus obligaciones contractuales asumidas con CORFO, en especial, la de resguardar la subsistencia e integridad de las pertenencias mineras OMA* [24].

En el año 2016, se formularon cargos en contra de SQM por parte de la SMA por el incumplimiento contractual de monitorear y cuidar los Algarrobos dentro de su territorio. De estos, se identificaron 23 ejemplares muertos, el 32,4% del total que SQM debía conservar. Además, se agravó la situación ya que la empresa nunca informó lo ocurrido con las especies a la SMA, dando a entender que el impacto en la vegetación del sector nunca fue de interés para la compañía [25].

El año 2017 Rockwood (Albermale), presentó un escrito a la SMA buscando que se sancionase a SQM por las sospechas fundadas que tenía sobre que esta última estuviera extrayendo más salmuera de la permitida, poniendo en peligro la operación de Albermale y el balance del ecosistema. La empresa solicitante escribió el siguiente párrafo: *este hecho, se considera muy importante de ser verificado, pues por un lado, una extracción de salmuera mayor a la permitida por SQM en el salar repercute en la disponibilidad de reservas en la cuenca para los demás titulares de proyectos, pero desde un punto de vista ambiental, se pone en riesgo la integridad ambiental de los sistemas lagunares de la cuenca tomando en cuenta que los efectos de las extracciones no se reflejan necesariamente en el corto plazo sino que a veces, en un periodo mas largo* [26].

Arista social

Al rededor de la cuenca del Salar de Atacama conviven variadas comunidades que, inevitablemente, se ven involucradas en toda acción de explotación que se realice dentro del salar. Estas incluyen, aunque no están limitadas a, la minería, el turismo y la agricultura; de las cuales las comunidades forman parte activa. En particular, los Lickanantay y las comunidades de Toconao, Peine, Camar, Socaire y Talabre se ven principalmente afectadas por la minería del litio que se realiza en la zona hace mas de 25 años.

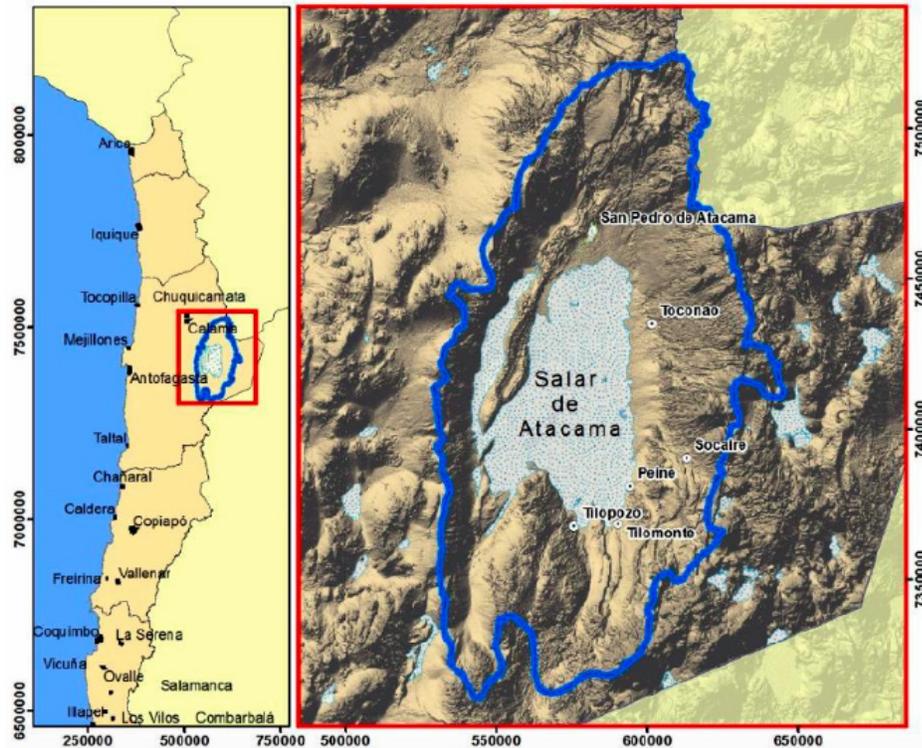


Figura 2.25: Mapa de la cuenca del Salar de Atacama. Se pueden apreciar las comunidades aledañas al mismo [27].

Los integrantes de estas comunidades, además de participar como obreros de la minería del litio, participan también de la minería del cobre y de la actividad agrícola y ganadera altoandina, aunque esta última ha presentado un decaimiento importante en el último tiempo debido a la creciente escasez de agua, la cual se ha visto incrementada por la actividad minera y el turismo. De hecho, este último es la principal actividad económica de las comunidades de la zona, las cuales aprovechan la condición de *Zona de Interés Turístico (ZOIT)* del municipio de San Pedro de Atacama, establecida mediante la ley 20.423. En este sentido, cabe destacar que San Pedro de Atacama recibe cerca de 100 mil visitantes extranjeros cada año [27].

Las actividades económicas anteriormente mencionadas han traído un elevado estrés hídrico a la zona, cada una en diferente proporción. Sumado a esto, la venta excesiva de derechos de agua para extracción, por sobre la capacidad de recarga de la cuenca y los caudales de los ríos, ha generado un escenario aún peor en el lugar. De hecho, las comunidades aledañas al salar han visto una disminución preocupante del recurso a través de los últimos años, necesitando reforzar los aportes hídricos de la zona redireccionando causes como los del río Vilaco y estableciendo turnos de riego para las zonas agrícolas, en especial las cercanas al río Toconao.

Por otro lado, el establecimiento de campamentos mineros por parte de las dos empresas explotadoras del mineral de litio ha traído importantes consecuencias a nivel sociocultural en la zona, causando reacciones variadas por parte de las comunidades afectadas. Por una parte, varios miembros de ellas han recibido con manos abiertas los nuevos puestos de trabajos e ingresos que significa el aumento de la extracción, mientras que por otra, se han generado fuertes críticas y protestas en contra de las empresas mineras, debido a la existencia de varias irregularidades y acuerdos poco transparentes sobre el uso de los recursos.

Por ejemplo, en el año 2012 la comunidad de Peine firmó un convenio con la empresa Rockwood (hoy Albermale), requisito impuesto por la CORFO para aumentar a más del doble la extracción de litio de la empresa. En dicho convenio se establecía que el 3% de los ingresos por ventas anuales del mineral irían a parar a la comunidad (lo que se tradujo en cerca de US\$ 200.000), además se pactó un monitoreo conjunto de los niveles de acuíferos del salar, no exento de críticas. En general, los pobladores no han cuestionado mayormente a la empresa debido a los ingresos que han recibido de ella y la fuerte relación que ha establecido la misma con las comunidades [27].

Otro caso muy diferente es el que ha protagonizado la empresa SQM. En el año 2007 hubo un fuerte enfrentamiento entre la empresa y los pobladores de la comunidad de Toconao, debido a la extracción de agua de pozos no autorizados en el contrato establecido con la CORFO y por la contaminación causada por vertido de aguas servidas en los campamentos que tiene la empresa al borde del salar; aguas que utilizan los animales autóctonos de la zona para beber. En febrero del año 2018, varias organizaciones comunales, indígenas y vecinales presentaron dos recursos de protección ante la Corte de Apelaciones de Santiago por el daño ambiental causado al salar y por no haber realizado la debida consulta indígena previa en cuanto al convenio que se buscaba celebrar entre CORFO y SQM para triplicar la producción de litio de la empresa. Dado lo anterior, la firma del convenio provocó grandes manifestaciones junto con la huelga de hambre de tres dirigentes atacameños [27].

En la actualidad, emergen tensiones por el incumplimiento de las cláusulas de los convenios previamente firmados, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la mínima fiscalización a las empresas mineras. Los monitoreos de las cuencas se declaran como insuficientes por parte de las comunidades, mientras que la afectación de los ecosistemas es cada día más clara, dejando a varias comunidades aledañas al margen del avance de la minería.

En primer lugar, se procederá a realizar un proceso comparativo de las diferentes tecnologías presentadas en los antecedentes, considerando las características del Salar de Atacama, sus costos estimados, requerimientos de operación, características energéticas y el estado del arte. La razón principal de este análisis comparativo, es seleccionar la tecnología que mejor se adecúe a las condiciones de operación actuales y ofrezca, de manera preliminar, la mejor opción de reemplazo en el proceso de extracción de litio. Lo anterior se efectuará mediante bibliografía pertinente y actualizada.

Una vez escogida la tecnología de desalinización a utilizar, se creará un modelo computacional basándose en bibliografía específica, por medio del software Matlab, el cual calculará todo lo necesario para modelar el sistema. Cuando el programa haya sido creado y ejecutado, se validarán los datos obtenidos con datos de plantas reales encontrados en la bibliografía.

Luego, se evaluará el modelo por medio de la introducción de casos de estudio. En estos se variarán diferentes variables, valga la redundancia, y se extraerán los productos de estos cambios en las condiciones, generando un espectro de resultados y escogiendo el mejor caso de estudio posible. Se espera que a partir de lo anterior se puedan extraer las primeras conclusiones sobre la factibilidad técnica del proyecto. Además, obtener resultados positivos en esta etapa del trabajo implicaría una correcta elección de la tecnología al principio del mismo.

Considerando lo previamente señalado, se realizará un dimensionamiento de una planta solar que entregue la energía necesaria al sistema para poder funcionar. Para ello se utilizarán, primeramente, suposiciones matemáticas lógicas, basadas en bibliografía pertinente. Una vez obtenidos los primeros resultados, se reevaluará la planta en el software SAM, dando un modelado mucho más robusto.

A partir de los datos obtenidos en las etapas anteriores, se procederá a realizar una evaluación económica. En ella se introducirán indicadores y estimaciones que permitan determinar la factibilidad de la planta en el largo plazo (30 años). Luego, se hará un análisis de las diferentes sensibilidades económicas a las que puede estar sujeta la planta y su afectación sobre la factibilidad.

Finalmente, se discutirán los resultados de factibilidad técnica y económica obtenidos, extrayendo de esto las conclusiones del trabajo y ofreciendo recomendaciones pertinentes que involucren todo lo desarrollado junto con los antecedentes recopilados para el mismo efecto.

4.1. Elección de la Tecnología a Utilizar

4.1.1. Consideraciones previas

Para seleccionar de buena manera la tecnología que se utilizará en el desarrollo del trabajo, es necesario considerar ciertos aspectos que apoyarán en la argumentación de la toma de decisión final. Dichos aspectos permitirán acotar las tecnologías a comparar, dando espacio a una explicación profunda de las características y contrastes de cada una.

Para comenzar, es necesario explicar de manera más detallada las propiedades presentes en la salmuera que contiene el litio en el salar. Esto se debe a que, para diferentes niveles de concentración, tanto los costos de desalinización como la aplicabilidad de ciertas tecnologías varían.

La salmuera del Salar de Atacama presenta una salinidad extremadamente alta, donde la solución se encuentra en una proporción aproximada de 30/70 en sales/agua. Se considera además que aproximadamente 0,15 [g/l] de litio están presentes en las salmueras del salar.

Los costos de desalación pueden separarse en dos grupos principales: los costos por capacidad desaladora y los costos por tipo de energía utilizada; tanto en agua de mar como salobre. Para ejemplificar estos costos, se utilizaron datos provenientes de bibliografía pertinente, representados en las tablas 4.1 y 4.2 [28].

Tabla 4.1: Costos de desalar agua salobre o de mar según el tamaño de planta[28].

| Tipo de agua | Tamaño de la planta [$m^3/día$] | Costo [$\$/m^3$] |
|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Salobre | <1000 | 0,78-1,33 |
| | 5000 - 60000 | 0,26-0,54 |
| Agua de Mar y Salmueras | <1000 | 2,21-11,60 |
| | 1000-5000 | 0,69-3,91 |
| | 12000-60000 | 0,44-1,62 |
| | >60000 | 0,50-1,00 |

Tabla 4.2: Costos de desalar agua salobre o de mar según tipo de energía[28].

| Tipo de Agua | Tipo de Energía | Costo [$\$/m^3$] |
|-------------------------|-----------------|--------------------|
| Salobre | Convencional | 0,26-1,33 |
| | FV | 5,49-12,80 |
| | Geotermal | 2,48 |
| Agua de Mar y Salmueras | Convencional | 0,434-3,35 |
| | Eólica | 1,24-6,20 |
| | FV | 3,89-11,16 |
| | CS | 4,34-9,92 |

4.1.2. Comparación de tecnologías de desalinización

Como se explicó en la sección de antecedentes, la variedad de tecnologías que pueden ser utilizadas para desalinizar agua son muchas, por lo tanto, escoger la más adecuada para cada aplicación conlleva un análisis exhaustivo de todos los aspectos involucrados en ellas.

En el caso particular, dado que se busca mejorar el proceso de extracción del litio mientras se disminuye su impacto ambiental, los procesos de desalinización por medios químicos quedan descartados de manera inmediata. Lo anterior, debido a que introducirán compuestos indeseables en la salmuera, cambiando todo el proceso productivo posterior, el cual buscará deshacerse de ellos, aumentando los costos de producción en el proceso. Sumado a esta situación, como se busca reinyectar parte del agua para mantener un balance favorable de la cuenca, se estarían introduciendo químicos al ecosistema que podrían dañar el mismo de manera irreparable.

Los caudales de agua manejados en este tipo de operaciones mineras necesitan de tecnologías con un alto grado de madurez y que puedan cubrir los niveles de producción requeridos. Por lo mismo, solo 4 tecnologías cumplen dichos criterios, y de ellas, solo una no pertenece al subgrupo térmico de la desalinización: la osmosis inversa. Este tipo de tecnología posee consumos energéticos que pueden competir de buena manera con sus contrapartes térmicos, en especial a gran escala. Aún así, el hecho de que sea una tecnología que requiere de componentes complejos para lograr desalinizar (filtros y membranas), hace que exista un límite de salinidad al que las plantas de osmosis inversa puedan operar sin acortar demasiado la vida útil de estos componentes. Además, cabe tener presente que el rango de operación de salinidad para las plantas de osmosis inversa es de aproximadamente 30.000 a 60.000 [ppm] [29]. Esto, por lo expuesto en la sección anterior y en los antecedentes, se encuentra muy por debajo de la salinidad presente en el Salar de Atacama. Por lo mismo, y considerando que los procesos térmicos no tienen un límite de salinidad definido, se descarta la opción de utilizar osmosis inversa como método de desalinización.

Habiendo descartado los dos subgrupos anteriores, la única opción viable para poder introducir desaladores al proceso de extracción de litio, es la opción térmica. Dentro de esta, solo tres tecnologías poseen una madurez suficiente para aplicarlas en la realidad: MED, MSF y VC. A continuación, se presenta una comparación detallada, discutiendo pros y contras para definir la tecnología más favorable a utilizar.

Tabla 4.3: Comparación de las características principales de tecnologías de desalinización térmicas [EP]

| Característica | MSF | MED | VC | Referencia |
|--|--|---|-----------------|--------------|
| Input de potencia mecánica [kW/m ³] | 2,5-6 | 1,5-2,5 | - | [5][29][30] |
| Requerimientos de energía [kWh/m ³] | 18,3-28,5 | 14-21,6 | 16-26 | [29][31][32] |
| Consumo de energía eléctrica para bombas [kWh/m ³] | 2,5-5 | 2-2,5 | 8 | [29][31] |
| Consumo de energía térmica [MJ/m ³] | 81-282 | 50-230 | - | [29][33] |
| Capacidad de producción [m ³ /día] | <100-1.025.000 | <100-320.000 | 10.000-30.000 | [29][31][34] |
| Precio de equipos [\$US/m ³] | 950-1.900 | 900-1.700 | - | [5] |
| Costo de instalación [\$US/m ³] | 1.080-1.690 | 780-1.080 | - | [30][35] |
| Costo operacional [\$US/m ³] | 0,05-0,07 | 0,04-0,07 | - | [35] |
| Costo de recambio [\$US/m ³] | 0,02-0,04 | 0,02-0,03 | - | [35] |
| Costo del agua [\$US/m ³] | 0,52-5 | 0,52-10 | 0,87-2,63 | [28][32][33] |
| Escala de aplicación | Mediana/Grande | Pequeña/Mediana | Pequeña/Mediana | [5] |
| Pre-tratamiento del agua | Inhibidor de incrustaciones y antiespumante. Polifosfato | Nula o inhibidor de incrustaciones (dependiendo del TBT). Polifosfato | - | [5][36][37] |
| Porcentaje de participación de la tecnología en el mercado [%] | 87,3 | 12,5 | 0,2 | [31] |
| Fabricantes | Numerosos | Escasos | - | [30] |
| TBT [°C] | 90-120 | 50-90 | 63-70 | [29][30][32] |
| Presión de operación | Subatmosférica | Subatmosférica | - | [34][37] |
| Capacidad de hibridación | Baja | Alta | Alta | [37] |
| Calidad de agua desalinizada (ppm) | <10 | <10 | <10 | [29][30] |
| Producto en relación al agua de mar bombeada [%] | 30-45 | 30-45 | - | [29][30] |
| Limpiezas de mantenimiento | 2-4 veces al año | 1-2 veces al año | - | [30] |
| Superficie de terreno requerida | Mucha | Media | - | [30] |
| GOR óptimo | 7-12 | 8-16 | 12 | [31][32][34] |
| Cantidad típica de etapas | 4-40 | 2-21 | - | [5][32][34] |

Al analizar la tabla 4.3, se puede apreciar, primeramente, la diferencia en capacidades de producción de las diferentes tecnologías. En el caso del MSF, la capacidad de producción supera con creces las de la tecnología MED y VC, resultando en una mayor escala de aplicación. Lo anterior se debe, principalmente, a la mayor participación en el mercado de la destilación flash, respaldada a su vez por una alta inversión en países como Arabia Saudita y Emiratos Árabes Unidos, los cuales presentan una gran necesidad de desalinización de agua para consumo humano. La escala en la que trabaja esta tecnología significa un aumento en ciertos costos, principalmente los costos de instalación, operación y recambio (debido a la mayor cantidad de efectos que presenta). Aún así, los costos de producción de agua se mantienen competitivos con sus contrapartes térmicos; existe un trade-off entre la mayor cantidad de equipos (que significa un aumento en el costo de capital y operativo) y la mayor escala de producción (que significa un menor costo de producción, tal como lo refleja la tabla 4.1).

Considerando por otro lado las características termodinámicas de las tecnologías, se extrae de manera inmediata la menor necesidad energética que requiere la tecnología MED con respecto a sus contrapartes. En primer lugar, debido a que la tecnología MED no necesita de bombas de alto consumo, el input de potencia mecánica por metro cúbico de producción es considerablemente menor que el del MSF. Esto posiciona a la tecnología de destilación por múltiple efecto como un candidato más idóneo para ser instalado en zonas remotas, donde la electricidad no es abundante o fácil de obtener. Además, los requerimientos energéticos, en específico, el consumo de energía térmica de esta tecnología, es menor que los del sistema flash y por compresión, lo que abre una oportunidad realista para la instalación con colectores solares de baja temperatura para el funcionamiento de ellos, debido a la menor TBT. Lo anterior toma aún más importancia cuando se analiza la tabla 4.2, en la cual se puede apreciar cómo la desalinización de agua con colectores solares (CS) como fuente de energía se mantiene como una de las más caras, por lo que limitar este costo lo más que se pueda pasa a ser de gran interés.

Otro de los grandes temas a considerar es el de las incrustaciones; el cual es muy común en este tipo de tecnología desaladora. La temperatura a la que se trabaja en estos sistemas fomenta la formación de escamas de calcio-sulfato que pueden incrustarse en los equipos, causando bajas en la eficiencia o incluso, si el problema es muy grave, pérdida total del mismo. Así, mientras se trabaje a menor temperatura, menor es la posibilidad de generar dichas incrustaciones. El sistema MED, al trabajar a una TBT menor, bajo ciertas condiciones puede llegar a operar bajo el límite de la formación de escamas, operando por debajo de la curva de solubilidad de calcio-sulfato [37]. Esto significa una menor inversión en sistemas de pre-tratamiento, lo que trae tres ventajas: primero, disminuir la cantidad de químicos que se le agrega al flujo reduce considerablemente los costos de operación; segundo, que no existan o que se minimicen las incrustaciones significa una menor frecuencia en el mantenimiento (disminuyendo los costos que ello implica y manteniendo un grado de operación más constante); por último, como se busca reinyectar parte del agua destilada al final del proceso, además de extraer la salmuera, que los flujos estén contaminados con químicos externos significaría un posible daño al medio ambiente del salar y un mayor costo a la hora de tratar el producto final.

Finalmente, la última gran característica a considerar es la eficiencia de los procesos. El GOR, como se expuso en la sección de antecedentes, es un buen indicador de la eficiencia que presenta es tipo de tecnologías. Analizando los datos, se puede observar como el GOR óptimo más alto es el del MED, superando por cuatro números en el límite superior al MSF y al VC. Esto se explica principalmente debido a la estabilidad de los flujos en el MED y el mejor aprovechamiento del calor latente que presenta esta tecnología. Además, aquello le permite alcanzar altas eficiencias con un bajo nivel de etapas, disminuyendo los costos de capital. Por último, la capacidad de hibridación del MED es mucho más alta que la del MSF debido a que sus flujos no se mezclan, lo que permite acoplar sistemas que aprovechen mejor las pérdidas de energía inherentes al MED. Una de las hibridaciones más comunes es la de MED-TVC, la cual se caracteriza por utilizar el vapor de menor presión y temperatura de alguno de los efectos del MED para aumentar su presión (y por ende su temperatura) y reutilizarlo como vapor de alimentación en el primer efecto. Lo dicho es que se reduce la cantidad de vapor necesario para la misma cantidad de efectos, permitiendo sistemas térmicos de menor envergadura, ahorrando así costos. El resultado de esto es el aumento en cerca de un 20 % en el GOR del sistema [37].

4.1.3. Elección de la tecnología a utilizar y sistema propuesto

Considerando lo expuesto en la sección anterior, y teniendo en cuenta las características de la salmuera del Salar de Atacama, incluyendo la radiación solar presente y su relativa posición de aislamiento geográfico, la tecnología MED es la que presenta más ventajas comparativas en cuanto a sus contrapartes MSF y VC. Dicho esto, es necesario indicar que, debido a la alta radiación de la zona, se escoge incorporar un sistema solar de concentración para proporcionar la mayor parte de la energía a la planta. Lógicamente, será necesario considerar un sistema de almacenamiento y una caldera auxiliar que respalden dicha planta para un funcionamiento más completo durante el año.

Idealmente, se utilizará la planta durante las 24 [hrs] del día. Eso aportará de mejor manera al factor productivo de la planta con respecto al proceso actual, permitiéndole concentrar litio en horas sin sol. Considerado todo lo anterior, se introduce un sistema hibridado de tipo MED-TVC, el cual permitirá una mejor utilización del recurso solar, aumentando la eficiencia y disminuyendo los costos y la temperatura necesaria para operar.

4.2. Creación del Modelo

Diagrama completo

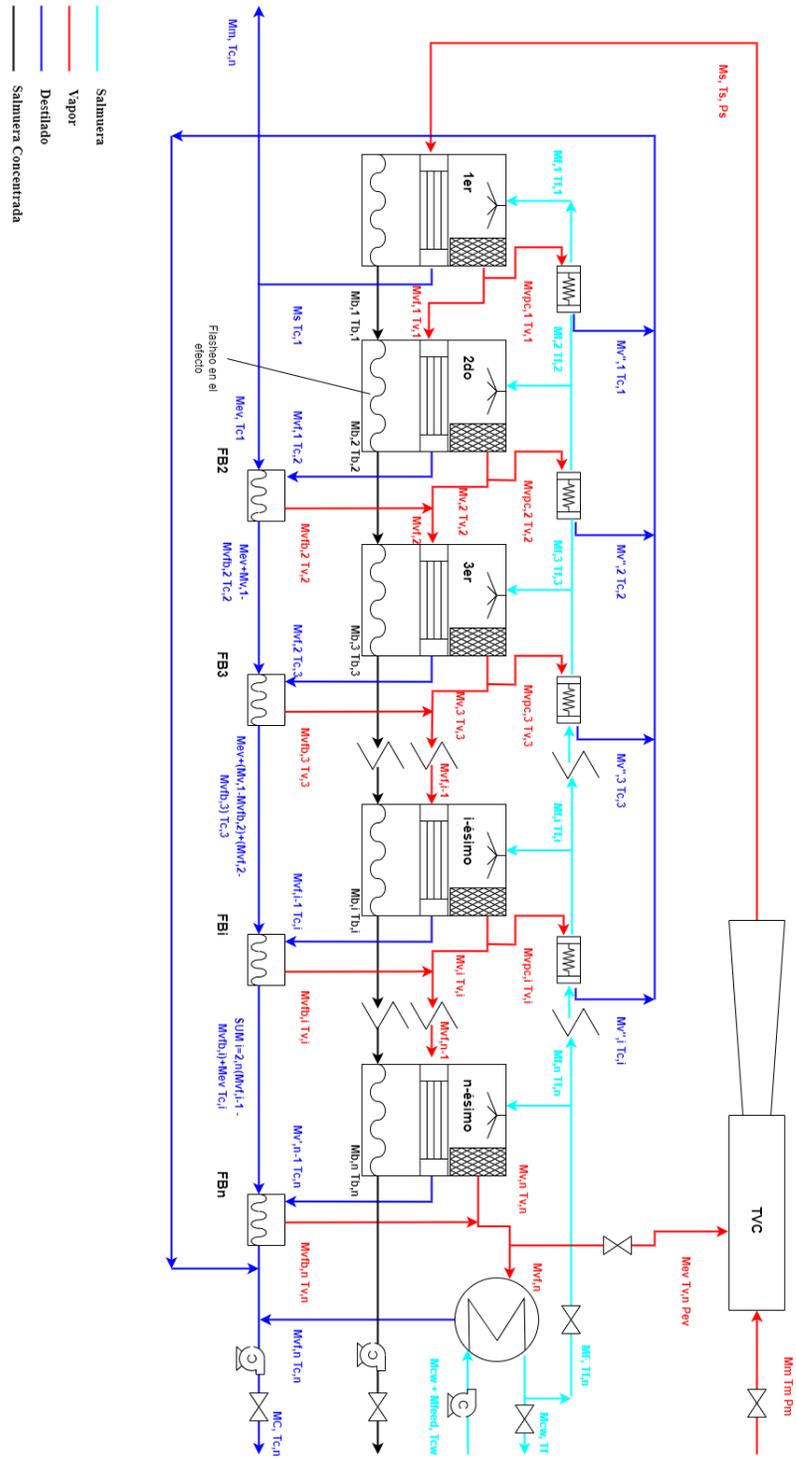


Figura 4.1: Esquema del modelo TVC-MED a utilizar [EP]

A partir de lo concluido en la sección 4.1 se establece el modelo a utilizar para realizar el estudio basado en la hibridación tipo *TVC-MED*. Un esquema general puede verse en la figura 4.1, en la que se vislumbran todos los componentes, los flujos que pasan por ellos y la interacción entre los mismos. A continuación, se procede a explicar el funcionamiento general del modelo propuesto.

El agua bombeada desde el salar (representada por las líneas celestes) es llevada, en primer lugar, al condensador del sistema. En él, por medio del intercambio de calor producido con el vapor del último efecto, sube su temperatura antes de ser alimentada al sistema como tal. Cabe destacar que antes de ser alimentada a los efectos, parte de ella es retornada al salar; la proporción de la misma está determinada por los requerimientos y características preestablecidas del sistema (número de efectos, cantidad de concentrado a producir, salinidad, entre otras).

Luego, la salmuera es alimentada hacia los diferentes efectos del sistema. Antes de cada uno de ellos (a excepción del efecto n), la salmuera de alimentación es introducida a un precalentador, parte del vapor producido en el efecto correspondiente es utilizado para calentar la salmuera que se introducirá al mismo hasta una temperatura un poco menor a la temperatura de saturación. Así, a medida que se introduce la salmuera a los efectos se aprovecha de mejor manera el calor latente del fluido caloportador, aumentando la eficiencia general del proceso.

Para que el sistema funcione de manera correcta, y como se expuso en la sección de antecedentes, es necesario el aporte de una fuente de calor externa proporcionada por un fluido. En este sistema en particular, se utiliza una mezcla de vapor a alta presión proveniente del termocompresor, el cual mezcla parte del vapor a baja presión generado en el último efecto y un vapor motor a alta temperatura y presión producido en los colectores solares. El vapor resultante es luego suministrado como fluido caloportador al primer efecto. Es necesario notar que el mismo flujo de vapor motor es extraído del destilado final, así, se genera un sistema que depende, en principio, solo de la salmuera introducida desde el salar y la radiación solar.

En cada uno de los efectos, a excepción del primero, el vapor producido en el efecto anterior sirve como fuente de calor para evaporar la salmuera de alimentación introducida. Esto se puede producir debido a la presión decreciente entre efectos. A partir de esta evaporación se generan tres flujos resultantes; dentro de los tubos del intercambiador de calor el vapor introducido desde el efecto anterior se condensa, yendo a parar al flashbox de destilado correspondiente. En segundo lugar, a partir de la salmuera de alimentación se produce salmuera concentrada y vapor que se asume libre de salinidad. Dentro del efecto, debido a la baja súbita de presión, se produce un fenómeno de evaporación flash en la salmuera que proviene del efecto anterior.

En cada efecto la salmuera concentrada es recolectada con la del efecto anterior, una vez se llega al efecto n -ésimo se obtiene el flujo de salmuera concentrada esperado con la salinidad deseada. En cuanto al destilado producido, luego de cada efecto es llevado a una flashbox en donde se mezcla con el destilado del efecto anterior. La diferencia de presión súbita genera nuevamente un fenómeno flash; el vapor producido en este componente es reinyectado al vapor producido en el mismo efecto. Una vez que se pasó por la última flashbox, el destilado final es recolectado con el producido en el condensador y aquel que no se devuelve a los colectores solares es reintroducido en el salar (la manera en que esto sucede no es explorado en este estudio).

4.2.1. Supuestos del modelo

Se realizan los siguientes supuestos en el modelo para simplificar algunos cálculos [38][39][40][41][42][43]:

- Se diseña para un régimen estacionario.
- La diferencia de temperaturas entre efectos se asume constante.
- El aumento de temperatura en los precalentadores es constante.
- El destilado generado posee salinidad cero.
- No se consideran pérdidas termodinámicas con el ambiente.
- No se considera la existencia de gases no condensables.
- Se considera el aumento de la temperatura de ebullición por salinidad (BPE).
- Se refleja la pérdida de carga en la condensación del vapor como 0.63 [°C] por debajo de la temperatura del vapor.
- Para calcular el porcentaje de vapor flasheado se considera el NEA o permisividad de no equilibrio.¹
- La temperatura TBT se asume 5 [°C] por debajo de la temperatura del vapor caloportador del primer efecto.
- Se asume una recuperación de salmuera de 62,5 %.
- Se asume una distribución equitativa del flujo de alimentación por efecto.

4.2.2. Parámetros de entrada

Se presentan los parámetros de entrada del modelo creado:

- n : Número de efectos
- T_s : Temperatura del fluido caloportador del primer efecto [°C]
- $T_{b,n}$: Temperatura de la salmuera del último efecto [°C]
- T_{cw} : Temperatura del agua de enfriamiento del condensador [°C]
- $X_{b,f}$: Salinidad de la salmuera concentrada resultante [ppm]
- P_m : Presión del vapor motor [kPa]
- M_m : Flujo másico del vapor motor [$\frac{kg}{s}$]

¹ Diferencia entre la temperatura real de la salmuera que sale del efecto y la temperatura correspondiente al equilibrio termodinámico con la presión reinante en el flasheo.

4.2.3. Balances de energía y masa

A continuación, se presentan los cálculos hechos en los diferentes componentes para balancear todo el sistema de manera termodinámica. Los diagramas dentro de esta sección denotan 4 flujos en particular. En primer lugar, representado con el color celeste y la letra "f", se presenta la salmuera de alimentación; bombeada desde las napas salinas subterráneas del salar. En segundo lugar, el flujo de color rojo y primera letra "v" representan los vapores generados por diferentes componentes dentro del sistema; vapor libre de cualquier tipo de salinidad. El flujo azul, en tercer lugar, representa este mismo vapor pero en estado líquido, pasando a llamarse destilado y denotado con la letra c. Por último, el flujo negro representa la salmuera concentrada que se extrae a partir de la evaporación de la salmuera de alimentación, su letra característica es la "b". La excepción a la regla son los parámetros provenientes del termocompresor y el condensador, los cuales obtienen su denominación propia.

Los subíndices utilizados corresponden, en primer lugar, al tipo de flujo que representan, seguido por el número del efecto que caracteriza a tal magnitud. Existen "n" efectos en total, seguidos de "n-1" precalentadores y flashboxes; con la diferencia que hay "1,..,n-1" precalentadores y "2,..,n" flashboxes. Todos los efectos son idénticos a diferencia del primero, en el cual ingresa el fluido proveniente del TVC, y el último, en el cual parte del vapor generado es devuelto al TVC.

Cálculos iniciales

A partir de los datos de entrada se generan varios cálculos que permiten obtener datos claves para la caracterización por componente.

Flujo de alimentación total [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{f,t} = \frac{M_{b,t} \cdot 100}{62,5} \quad (4.1)$$

Temperatura de la salmuera del primer efecto (TBT) [°C]:

$$T_{b,1} = T_s - 5 \quad (4.2)$$

Diferencia de temperatura entre efectos [°C]:

$$\Delta T = \frac{T_{b,1} - T_{b,n}}{n - 1} \quad (4.3)$$

Temperaturas de los efectos [°C]:

$$T_{b,i} = T_{b,i-1} - \Delta T \quad i = 2, \dots, n - 1 \quad (4.4)$$

Flujo de alimentación por efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{f,i} = \frac{M_{f,t}}{n} \quad \forall i \quad (4.5)$$

Temperatura del flujo de alimentación por efecto [°C]:

$$T_{f,i} = T_{b,i} - 5 \quad i = 1, \dots, n - 1 \quad (4.6)$$

Temperatura del flujo de alimentación al salir del condensador [°C]:

$$T_{f,n} = T_{cw} + 10 \quad (4.7)$$

Salinidad del flujo de alimentación [ppm]:

$$X = \frac{M_{b,t} \cdot M_{f,t}}{X_{b,t}} \quad (4.8)$$

TVC

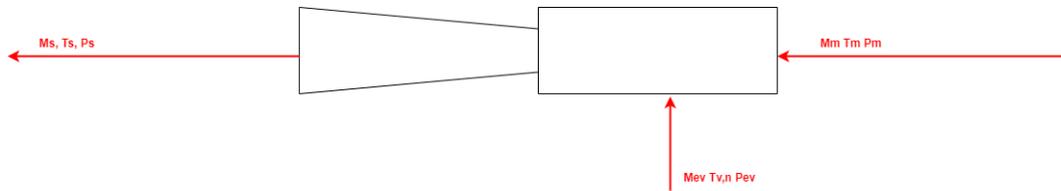


Figura 4.2: Esquema del Termocompresor[EP]

El termocompresor recibe vapor sobrecalentado a alta presión proveniente del campo solar llamado *vapor motor*, representado por M_m . Al entrar al equipo, la diferencia de presión que genera a través de una boquilla interna, crea un efecto de succión sobre una cierta cantidad de vapor a baja temperatura y baja presión proveniente del último efecto del sistema, representado por M_{ev} . El flujo resultante, a presión de saturación, corresponde al *vapor de calentamiento o fluido caloportador* que ingresará al primer efecto; es representado por M_s .

Razón de expansión:

$$ER = \frac{P_m}{P_{ev}} \quad (4.9)$$

Razón de compresión:

$$CR = \frac{P_s}{P_{ev}} \quad (4.10)$$

Razón de atrapamiento [40]:

$$Ra = 0.235 \cdot \left(\frac{P_s^{1,19}}{P_{ev}^{1,04}}\right) \cdot (ER^{0,015}) \cdot \left(\frac{PCF}{TCF}\right) \quad (4.11)$$

$$PCF = (3 \cdot 10^{-7}) \cdot (P_m^2) - (0,0009 \cdot P_m) + 1,6101 \quad (4.12)$$

$$TCF = (2 \cdot 10^{-8}) \cdot (T_{v,n}^2) - (0,0006 \cdot T_{v,n}) + 1,0047 \quad (4.13)$$

Flujo del vapor atrapado [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{ev} = \frac{M_m}{Ra} \quad (4.14)$$

Flujo del fluido caloportador [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_s = M_{ev} + M_m \quad (4.15)$$

Efecto 1

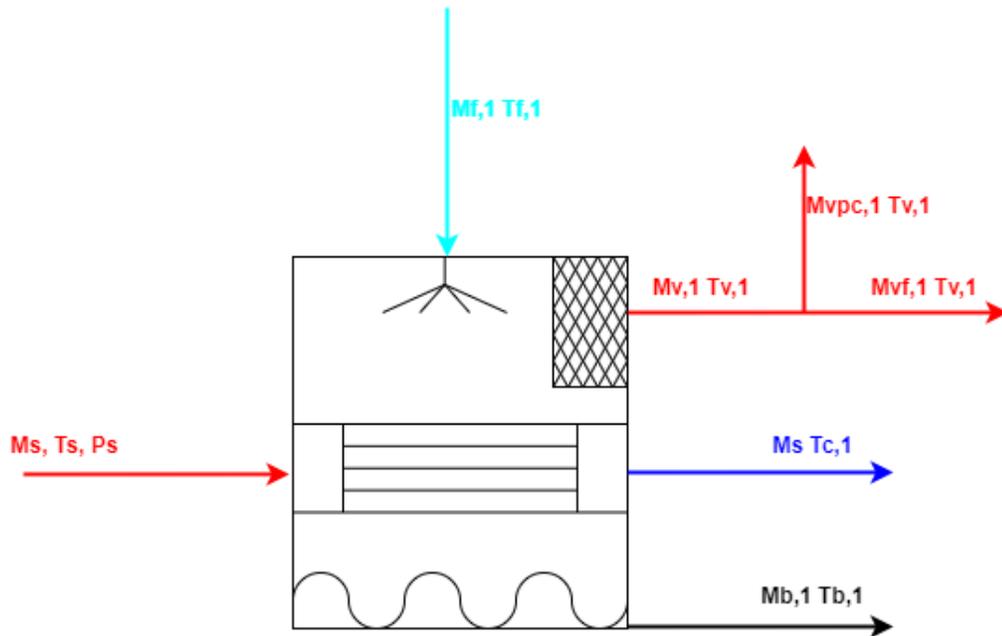


Figura 4.3: Esquema del primer efecto del sistema [EP]

El primer efecto recibe el vapor resultante del termocompresor. Aquí, alimentado por la salmuera precalentada a máxima temperatura, produce el vapor del primer efecto; este luego será el fluido caloportador para el segundo efecto. El vapor se produce debido al agua de alimentación que se atomiza en la parte superior de este, disminuyendo su superficie y descendiendo a contactarse con el intercambiador de calor que contiene el fluido M_s . La subsecuente interacción produce la evaporación de parte del fluido de alimentación, denominado vapor de efecto $M_{v,1}$. El resto del fluido no evaporado se le conoce como la salmuera concentrada, representada por $M_{b,1}$; la temperatura del vapor generado es menor que el de la salmuera concentrada gracias a la elevación del punto de ebullición por el aumento de salinidad. Ambos fluidos son llevados al siguiente efecto, eso si a $M_{v,1}$ se le extrae el flujo necesario para calentar el feed en el precalentador.

En este efecto no se produce flasheo ya que aún no existe una diferencia de vapor que pueda generar el vacío instantáneo necesario. Para eso, la salmuera concentrada deberá viajar al siguiente efecto, cuya menor presión generará el efecto flash.

El vapor condensado dentro de los tubos presenta una temperatura menor que la temperatura del vapor producido. Esto se debe principalmente a las pérdidas de carga que se pueden presentar dentro del intercambiador de calor, bajando por ende su temperatura (por simplicidad, esta se asume

constante e igual a 0,63 [°C]). El flujo condensado es luego separado en dos; M_{ev} sigue su camino hacia la primera flashbox, mientras que M_m es devuelto a los colectores solares para volver a energizarse y seguir el ciclo.

Flujo de vapor producido en el efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{v,1} = \frac{M_s \cdot \lambda_s - M_{f,1} \cdot C_{pf,1} \cdot (T_{b,1} - T_{f,1})}{\lambda_{b,1}} \quad (4.16)$$

Flujo de salmuera concentrada producida en el efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{b,1} = M_{f,1} - M_{v,1} \quad (4.17)$$

Salinidad de la salmuera concentrada [ppm]:

$$X_{b,1} = \frac{M_{f,1} \cdot X}{M_{b,1}} \quad (4.18)$$

Temperatura del vapor producido en el efecto [°C]:

$$T_{v,1} = T_{b,1} - BPE_1 \quad (4.19)$$

Temperatura de condensación dentro de los tubos [°C]:

$$T_{c,1} = T_{v,1} - 0,63 \quad (4.20)$$

Flujo de vapor final [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vf,1} = M_{v,1} - M_{vpc,1} \quad (4.21)$$

Flujo de destilado [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{c,1} = M_{ev} \quad (4.22)$$

Precalentadores

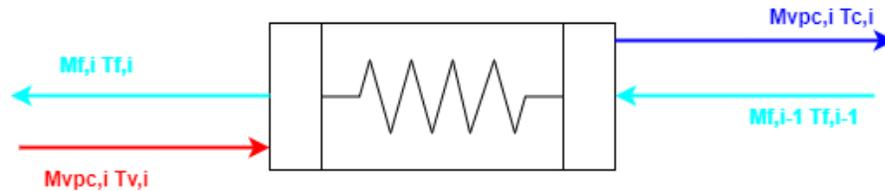


Figura 4.4: Esquema del precalentador [EP]

El flujo de vapor proveniente del efecto correspondiente se usa para calentar el agua de alimentación previa a entrar a dicho efecto. La cantidad de flujo destinada a este se condensa por completo, siendo reinyectado al destilado final en la última parte del proceso. El vapor proveniente del efecto i'' es denominado $M_{vpc,i}$, mientras que los flujos de alimentación se denominan como $M_{f,i}$ y $M_{f,i-1}$

para cada efecto.

Temperatura promedio entre flujos de alimentación consecutivos [°C]:

$$T_{f,prom} = \frac{T_{f,i} + T_{f,i-1}}{2} \quad (4.23)$$

Flujo de vapor que ingresa al precalentador [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vpc,i} = \frac{M_{f,i} \cdot C_{pf,prom} \cdot (T_{f,i} - T_{f,i-1})}{\lambda_{v,i}} \quad (4.24)$$

Efecto i-ésimo

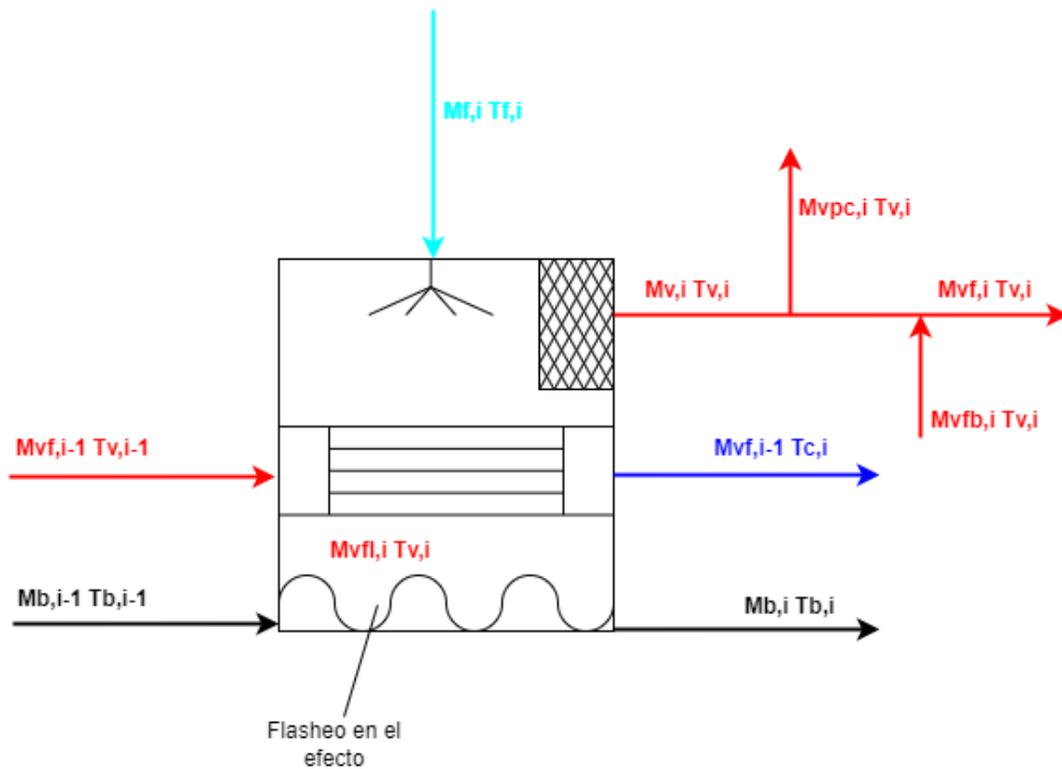


Figura 4.5: Esquema del efecto i-ésimo del sistema [EP]

El balance de masa del efecto i-ésimo es bastante similar al del primer efecto, salvo por algunos puntos clave. En primer lugar, el fluido caloportador proviene del vapor generado en el efecto inmediatamente anterior, denominado $M_{vf,i-1}$. Además, es importante notar que a partir del segundo efecto se empieza a producir vapor por flash de salmuera concentrada, producido por la diferencia de presión entre los dos flujos de salmuera concentrada. Este se denomina por $M_{vfl,i}$ y es sumado al vapor total generado por la evaporación del agua de alimentación.

Luego de generar el vapor dentro del efecto, al igual que en el primero, parte del flujo es enviado al precalentador correspondiente. La diferencia en este caso radica con el reintegro de vapor al flujo

antes de entrar al siguiente efecto. El vapor que se reintegra proviene de la flashbox de destilado asociada al efecto, representado por $M_{vfb,i}$, dando un mejor aprovechamiento del calor latente del flujo destilado.

El destilado producido dentro del efecto es llevado a la flashbox del siguiente efecto, produciéndose en ella el fenómeno comentado anteriormente. Cabe destacar que el vapor producido en el último efecto no es llevado a un precalentador ya que el fluido se calienta por el condensador del sistema. Además, como se comentó anteriormente, parte del vapor es entregado de vuelta al termocompresor.

Temperatura del vapor producido en el efecto [°C]:

$$T_{v,i} = T_{b,i} - BPE_i \quad (4.25)$$

Temperatura del vapor flasheado producido dentro del efecto [°C]:

$$T_{vfl,i} = T_{b,i} + NEA_{fl,i} \quad (4.26)$$

Flujo de vapor flasheado producido en el efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vfl,i} = \frac{M_{b,i-1} \cdot C_{pb,i-1} \cdot (T_{b,i-1} - T_{vfl,i})}{\lambda_{fl,i}} \quad (4.27)$$

Flujo de vapor producido en el efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{v,i} = \frac{M_{vf,i-1} \cdot \lambda_{c,i-1} - M_{f,i} \cdot C_{pf,i} \cdot (T_{b,i} - T_{f,i})}{\lambda_{b,i}} + \frac{M_{b,i-1} \cdot C_{pb,i-1} \cdot (T_{b,i-1} - T_{b,i}) + M_{vfl,i} \cdot \lambda_{fl,i}}{\lambda_{b,i}} \quad (4.28)$$

Flujo de salmuera concentrada producida en el efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{b,i} = M_{f,i} + M_{b,i-1} - M_{v,i} \quad (4.29)$$

Salinidad de la salmuera concentrada [ppm]:

$$X_{b,i} = \frac{M_{f,i} \cdot X + M_{b,i-1} \cdot X_{b,i-1}}{M_{b,i}} \quad (4.30)$$

Temperatura de condensación dentro de los tubos [°C]:

$$T_{c,i} = T_{v,i} - 0,63 \quad (4.31)$$

Flujo de vapor final [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vf,i} = M_{v,i} + M_{vfb,i} - M_{vpc,i} \quad (4.32)$$

Flujo de vapor en el n-ésimo efecto [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vf,n} = M_{v,n} + M_{vfb,n} - M_{ev} \quad (4.33)$$

Flashbox de destilado

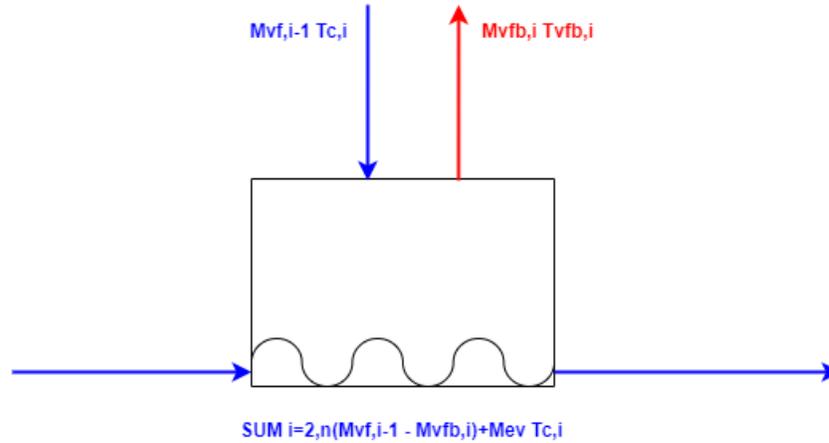


Figura 4.6: Esquema de la flashbox [EP]

La flashbox de destilado, como su nombre lo dice, se encarga de flashear parte del destilado proveniente del efecto anterior. Logra lo anterior debido a la diferencia de presión que se genera entre ese nuevo destilado y la acumulación de destilados provenientes de los efectos anteriores. Al flujo de destilado nuevo que entra se le denomina $M_{vf,i-1}$, mientras que al vapor flasheado se le denomina $M_{vfb,i}$.

Temperatura del vapor flasheado producido dentro del flashbox [°C]:

$$T_{vfb,i} = T_{c,i} + NEA_{fb,i} \quad (4.34)$$

Flujo de vapor flasheado producido en el flashbox [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{vfb,i} = \frac{M_{vf,i-1} \cdot C_{pb,i-1} \cdot (T_{c,i-1} - T_{vfb,i})}{\lambda_{fb,i}} \quad (4.35)$$

Flujo de destilado acumulado [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{c,i} = M_{vf,i-1} + M_{c,i-1} - M_{vfb,i} \quad (4.36)$$

Condensador

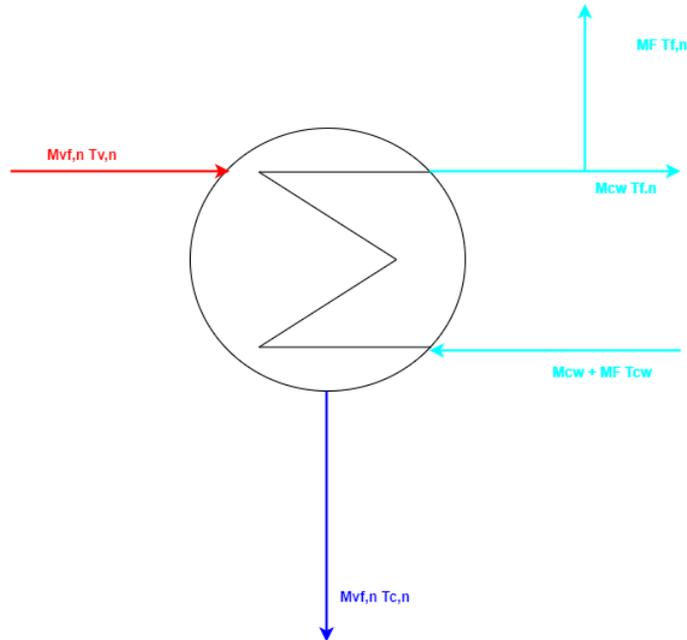


Figura 4.7: Esquema del condensador [EP]

El condensador, como su nombre indica, se encarga de condensar el flujo de vapor producido en el último efecto, además de calentar la salmuera de alimentación proveniente del salar. El flujo de agua de salar que no se utiliza como alimentación y que luego es reinyectada al salar se denomina M_{cw} . Mientras, el flujo que es destinado en partes iguales a los efectos se denomina $M_{f,t}$.

Diferencia de temperatura logarítmica del condensador [°C]:

$$LMTD_c = \frac{(T_{v,n} - T_{cw}) - (T_{c,n} - T_{f,n})}{\ln\left(\frac{T_{v,n} - T_{cw}}{T_{c,n} - T_{f,n}}\right)} \quad (4.37)$$

Área de intercambio térmico del condensador [m^2]:

$$A_c = \frac{M_{vf,n} \cdot \lambda_{c,n}}{U_c \cdot LMTD_c} \quad (4.38)$$

Flujo del agua de enfriamiento [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{cw} = \frac{M_{vf,n} \cdot \lambda_{c,n}}{C_{pf,n} \cdot (T_{f,n} - T_{cw})} \quad (4.39)$$

Flujos resultantes

Estos son los flujos finales tanto de destilado como de concentrado de salmuera.

Flujo de destilado total [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{c,f} = M_{ev} + \sum_{i=2}^n M_{c,i} + \sum_{i=1}^{n-1} M_{vpc,i} \quad (4.40)$$

Flujo de salmuera concentrada total [$\frac{kg}{s}$]:

$$M_{b,f} = M_{b,n} \quad (4.41)$$

Parámetros de rendimiento

Gained Output Ratio:

$$GOR = \frac{M_{c,f}}{M_m} \quad (4.42)$$

Calor específico [$\frac{kJ}{kg}$]:

$$Q = \frac{M_m \cdot \lambda_m}{M_{c,f}} \quad (4.43)$$

Correlaciones

Es necesario calcular diferentes propiedades termodinámicas del agua y las salmueras, así como el aumento de temperatura por efecto de la sal (BPE), para ello se introducen correlaciones. Las fórmulas toman las temperaturas, presiones o salinidades locales dependiendo del lugar de la planta que se esté evaluando.

Aumento de la temperatura de ebullición por salinidad [°C] [44]:

$$BPE = A \cdot \left(\frac{X}{34460}\right) + B \cdot \left(\frac{X}{34460}\right)^2 \quad (4.44)$$

$$A = 0,2034 + 0,1823 \cdot 10^{-2} \cdot T + 0,07097 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$$

$$B = 0,01351 + 0,02457 \cdot 10^{-2} \cdot T - 0,00872 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$$

Presión de saturación [kPa][40]:

$$P = 1000 \cdot \exp\left\{\frac{-3892,7}{T + 273,15 - 42,6776} + 9,5\right\} \quad (4.45)$$

Temperatura de saturación [°C]:

$$T = \frac{-330,472 \cdot \ln(7,48518 \cdot 10^{-8} \cdot P) - 3892,7}{\ln(7,48518 \cdot 10^{-8} \cdot P)} \quad (4.46)$$

Entalpía específica de saturación para líquido [$\frac{kJ}{kg}$][40]:

$$h_l = (-31,92 + 1,0011833 \cdot T + 3,0833323 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 4,6666663 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 3,3333334 \cdot 10^{-10} \cdot T^4) \cdot 2,326 \quad (4.47)$$

Entalpía específica de saturación para vapor [$\frac{kJ}{kg}$][40]:

$$h_v = 2499,15 + 1,955 \cdot T - 1,927 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (4.48)$$

Calor latente [$\frac{kJ}{kg}$]:

$$\lambda = h_v - h_l \quad (4.49)$$

Calor específico [$\frac{kJ}{kgC}$][40]:

$$C_p = \frac{a + (b \cdot T) + (c \cdot T^2) + (d \cdot T^3)}{1000} \quad (4.50)$$

$$a = 4206,8 - (6,6197 \cdot s) + (1,2288 \cdot 10^{-2} \cdot s^2)$$

$$b = -1,1262 + (5,4178 \cdot 10^{-2} \cdot s) - (2,2719 \cdot 10^{-4} \cdot s^2)$$

$$c = (1,2026 \cdot 10^{-2}) - (5,3566 \cdot 10^{-2} \cdot s) + (1,8906 \cdot 10^{-6} \cdot s^2)$$

$$d = (6,8777 \cdot 10^{-7}) + (1,517 \cdot 10^{-6} \cdot s) - (4,4268 \cdot 10^{-9} \cdot s^2)$$

$$s = \frac{X}{1000}$$

Permisividad de no equilibrio [$^{\circ}C$][39]:

$$NEA = 30 \cdot \frac{(T_j - T_i)^{0,55}}{T_{v,i}} \quad (4.51)$$

Coefficiente de transferencia de calor para el condensador [$\frac{kW}{m^2C}$][40]:

$$U_c = \frac{(1617,5 + 0,1567 \cdot T_{v,n}) - (0,1825 \cdot T_{v,n}^2) + (0,00008026 \cdot T_{v,n}^3)}{1000} \quad (4.52)$$

Diagrama del algoritmo

A continuación se presenta un diagrama que explica el procedimiento lógico del algoritmo para calcular los estados termodinámicos del sistema y los balances de masa y energía.

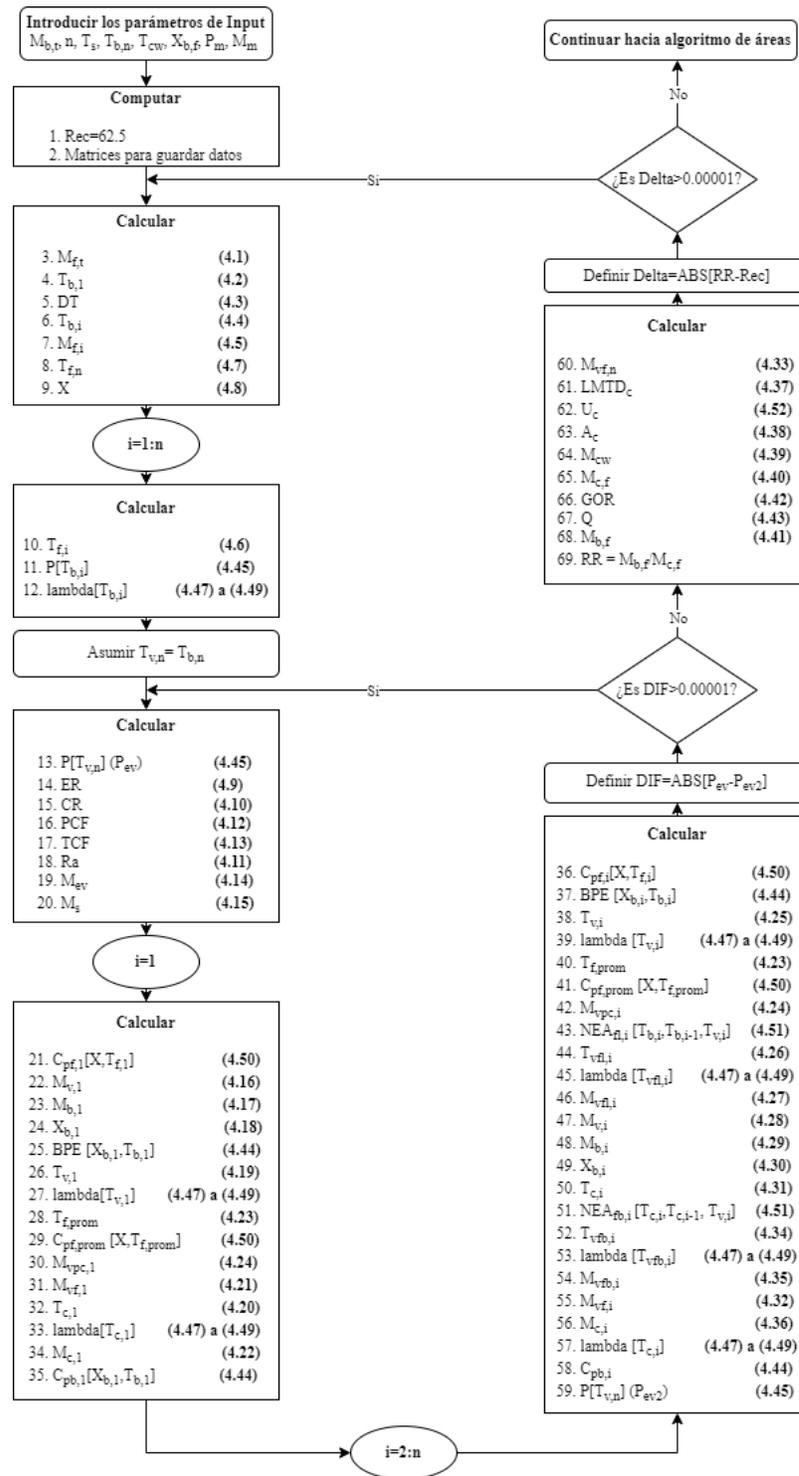


Figura 4.8: Diagrama de algoritmo de balance de masa y energía [EP].

4.2.4. Dimensionamiento de equipos

Para los efectos de realizar un dimensionamiento completo de la planta, es necesario conocer las áreas de intercambio térmico involucradas en el sistema. A este respecto, tanto los intercambiadores de calor de los efectos, como los precalentadores y el condensador final poseen un área que depende de varios factores termodinámicos. En particular, se rige por la siguiente expresión $Q = U \cdot A \cdot \Delta T$; en donde U representa el coeficiente de transferencia calor, Q el calor intercambiado y ΔT el cambio de temperatura entre flujos.

En primer lugar, se necesita conocer el ΔT que se genera entre los fluidos que interactúan en el intercambiador de calor. Dado que este intercambio no es necesariamente lineal y depende de las temperaturas y direcciones de los flujos, se introduce la diferencia de temperatura media logarítmica o *LMTD* por sus siglas en inglés. Así, la labor de este parámetro es minimizar el error que pueda existir al tomar la media de la diferencia de temperaturas entre dos flujos que interactúan por medio de un intercambiador. En específico, este error se acrecenta cuando hay flujos en contracorriente, o cuando uno o ambos flujos cambian de temperatura en el intercambio; es decir, cuando no cambian de fase. Cuando ambos cambian de fase, es preferible utilizar simplemente la diferencia de temperaturas entre flujos. La figura 4.9 muestra diferentes configuraciones para la ecuación de intercambio de calor en cuestión.

$$\Delta T = LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (4.53)$$

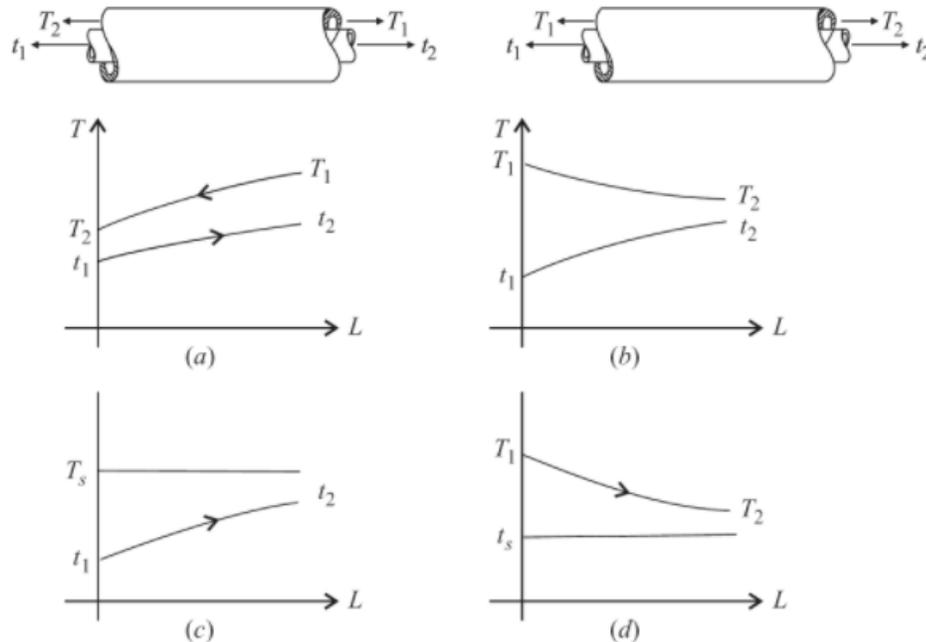


Figura 4.9: Cuatro casos en que es útil utilizar la LMTD para determinar la diferencia de temperaturas. a) Contracorriente. b) Paralelo. c) Fuente con temperatura constante. d) Receptor con temperatura constante. [45]

Un segundo parámetro a considerar es el coeficiente de transferencia de calor U , el cual mide

qué tan complicado es para un medio conducir calor. Dicho coeficiente es influido por el grosor y la conductividad térmica del medio que esté interactuando con la fuente de calor; la cual depende del material del que esté compuesto. Por ende, mientras más grande sea el coeficiente, más fácil es para la fuente calentar al receptor.

Debido a lo anterior y a lo complicado que es definir para esta etapa de la ingeniería el coeficiente en cuestión, se decide utilizar una serie de correlaciones que permiten modelar de buena forma este parámetro, dependiendo solamente de la temperatura del fluido que funcione como fuente de calor. En la ecuación 4.52 presente en la subsección anterior, se muestra una de estas correlaciones para la fórmula del área del condensador junto a la fuente desde la que fue extraída. Se utilizará esta misma para los precalentadores, mientras que para los intercambiadores de los efectos se utiliza una relativamente distinta. Ambas son presentadas a continuación [40].

$$U_i = \frac{(1939,4 + 1,4052 \cdot T_{b,i}) - (0,0207525 \cdot T_{b,i}^2) + (0,0023186 \cdot T_{b,i}^3)}{1000} \quad (4.54)$$

$$U_{pc,i} = \frac{(1617,5 + 0,1567 \cdot T_{v,i}) - (0,1825 \cdot T_{v,i}^2) + (0,00008026 \cdot T_{v,i}^3)}{1000} \quad (4.55)$$

Ambas ecuaciones corresponden a coeficientes de transferencia de calor para evaporadores y condensadores con un grado de suciedad incrustada, con el objeto de simular el peor de los casos.

El último parámetro a considerar es el del calor transferido, este varía caso a caso dependiendo del equipo en que se esté haciendo el cálculo, ya que dependiendo de los flujos involucrados y de si están cambiando de fase, el calor se calcula de manera diferente. Las ecuaciones para calcular el calor transferido en cada componente se extraen de la subsección de *Balances de masa y energía*.

4.2.5. Ajuste de áreas promedio

Debido a que la idea central de este estudio es dimensionar una planta piloto, se necesita, para simplificar la economía, estandarizar las áreas de los efectos y precalentadores a una sola. Para esto, se toma el valor promedio de las áreas de cada componente y aquel resultado se establece como área fija de todos ellos (a excepción del primer efecto, ya que este necesita ser independiente para captar todo el calor proveniente del termocompresor). Una vez hecho esto, se ajustan las temperaturas de los flujos de alimentación para que calcen las áreas fijas de los precalentadores y efectos, lo que por consiguiente modifica los flujos.

Para hacer lo previamente señalado, se plantea una ecuación que calcula la temperatura de los flujos de alimentación a partir de la temperatura del último efecto; lo anterior es calculado considerando la suposición de la ecuación 4.7. Esta ecuación se deshace al mismo tiempo de la suposición planteada en la ecuación 4.6.

$$T_{f,n-i} = T_{f,n-i+1} + \frac{U_{pc,n-i} \cdot A_{pc,prom} \cdot LMTD_{pc,n-i}}{M_{f,n-i} \cdot C_{pf,n-i}} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (4.56)$$

Una vez calculadas las temperaturas de los flujos de alimentación, se procede a tomar el área promedio de los efectos, a excepción del primero. Con este dato, se calculan todos los flujos másicos

que se ven modificados por estos nuevos valores; estos son, M_{vpc} , M_v , M_{vfl} , M_{vfb} , M_b , M_c . Además, los cambios en los flujos generan cambios en la salinidad y por ende en el BPE .

Al permitir este ajuste, se decide al mismo tiempo dejar ciertos parámetros iguales a la etapa anterior, así como hacer ciertas suposiciones nuevas. Estas son:

- Los parámetros de entrada iniciales se mantienen.
- Las temperaturas T_v y T_b no varían.
- Las áreas del condensador y del primer efecto se mantienen invariantes.
- Se mantienen las suposiciones sobre el aumento de temperatura del flujo de entrada en el último efecto y la diferencia de temperatura entre T_s y $T_{b,1}$.
- Las correlaciones anteriormente mencionadas siguen considerándose válidas.

Una vez calculados los flujos anteriores, se recalculan los parámetros de rendimiento (GOR , Q), la cantidad de destilado y salmuera final ($M_{c,t}$, $M_{b,t}$) y la razón de recuperación (RR). Se considera el área final como la suma de todas las áreas de los equipos.

4.2.6. Puesta en marcha de la planta

Dado que el sistema busca ser energizado, principalmente, por energía solar, es necesario saber cuánta potencia se necesita para ponerlo en marcha, y si, por ende, se justifica utilizar un sistema de almacenamiento, así como un sistema de respaldo, que permitan su funcionamiento durante las 24 horas del día.

Para realizar lo previamente señalado, se toma en cuenta la potencia necesaria para llevar todos los flujos del sistema desde la temperatura ambiente de la zona (a modo de suposición) a la temperatura de operación necesaria. Se presenta la ecuación 4.57, en la cual se aprecia el cálculo de potencia total necesaria para la puesta en marcha. Cada flujo másico tiene asociado al mismo una capacidad calórica dependiente de la temperatura, como se muestra en la ecuación 4.50, además de la diferencia de temperatura antes mencionada.

$$P_{total} = \sum \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.57)$$

Donde P_{total} está expresado en $[kW]$.

Para simplificar los cálculos, se asumen todos los intercambiadores de calor iguales y se desprecia la potencia necesaria para calentar los mismos. Se asumen también los promedios de cada uno de los flujos relevantes (alimentación, salmuera, vapor y destilado). Por último, es necesario mencionar que el cálculo será hecho en función del cambio de temperatura ambiente, por lo que se hará un análisis mensual de la zona del salar a través de un año típico.

4.3. Casos de Estudio

Dada la validación del modelo, se procede a presentar los casos de estudio, considerando los valores de entrada de cada uno de ellos y las variaciones para cada caso. Puesto que la localización de la planta se mantiene fija, varios de los datos de entrada son invariables. Aún así, se presentan dos datos claves que se mantendrán variables y que formarán en total 30 casos distintos a analizar para la factibilidad técnica. Los parámetros de entrada a utilizar se presentan a continuación.

Tabla 4.4: Datos de entrada y sus variaciones para los casos de estudio [EP]

| Parámetro | Unidad | Valor | Justificación |
|-----------|--------|----------------------------------|--|
| T_s | °C | 60 | Valor común para plantas TVC-MED [40] |
| $T_{b,n}$ | °C | 35 | Valor común para plantas TVC-MED [40] |
| T_{cw} | °C | 20 | Temperatura media del agua de las salmueras [14] |
| $X_{b,f}$ | ppm | 240000 | Salinidad media del salar [18] |
| M_m | kg/s | 8,9 | [46] |
| P_m | kPa | 350, 700, 1550, 2000, 3000, 4500 | - |
| n | | 3, 4, 5, 6, 7 | - |

Se procederá a hacer un análisis exhaustivo de los casos de estudio presentados, generando comparaciones cuantitativas que permitan escoger el más favorable. Para esto, se consideran como parámetros claves de rendimiento la cantidad de salmuera a producir, el GOR, el área específica de transferencia de calor y la razón de arrastre del sistema.

Es a partir de este análisis que se puede calcular la cantidad de litio a producir con el sistema, así como el dimensionamiento de los equipos de la planta desaladora. Esto entrega de manera directa la factibilidad técnica del estudio, dando los primeros datos productivos que permitirán el análisis económico del sistema completo.

4.4. Planta Solar y Componentes Asociados a Ella

Después de analizar los datos extraídos del modelo principal y habiendo seleccionado aquel que entrega comparativamente los resultados más favorables para la extracción de litio, se procederá a dimensionar todos los componentes que interactúan con la planta de manera externa. En la siguiente sección se abordarán los cálculos de la radiación solar, dimensionamiento de las áreas de captación de la planta solar, acumulación, entre otros equipos.

4.4.1. Dimensionamiento preliminar del campo solar

A partir del caso más favorable, se puede extraer el calor necesario para mantener al sistema funcionando. Considerando esto, se procederá a plantear el procedimiento de cálculos preliminares para la planta solar que entregará la energía.

Para efectos de lo anterior, se plantea un esquema ilustrativo que permite captar de buena forma el funcionamiento completo de la planta solar y su interacción con el sistema de desalinización. Ilustrado en la figura 4.10, se aprecia como la planta *TVC-MED* se relaciona con la planta solar de

manera directa, produciendo el vapor saturado necesario para el funcionamiento del termocompresor.

El agua saturada extraída del primer efecto de la planta es presurizada a la presión de funcionamiento del termocompresor, luego, es dirigida a la planta de colectores solares en donde aumenta su temperatura a la de saturación requerida. Ahora, dado que el Sol no está presente durante todo el día, se incorporan sistemas de almacenamiento de calor o *TES* dentro del flujo de la planta solar, con el objetivo de mantener una operación constante durante las 24 horas del día. Este sistema interactúa con el sistema principal por medio de un intercambiador de calor o *HEX*, en el cual se entrega la energía necesaria a un fluido caloportador (*HTF*) para luego almacenarse durante el día con su posterior uso nocturno. Por último, se incorpora una caldera de respaldo, la cual complementará al sistema solar cuando este no logre generar todo el calor necesario para la continuidad de funcionamiento del sistema desalador.

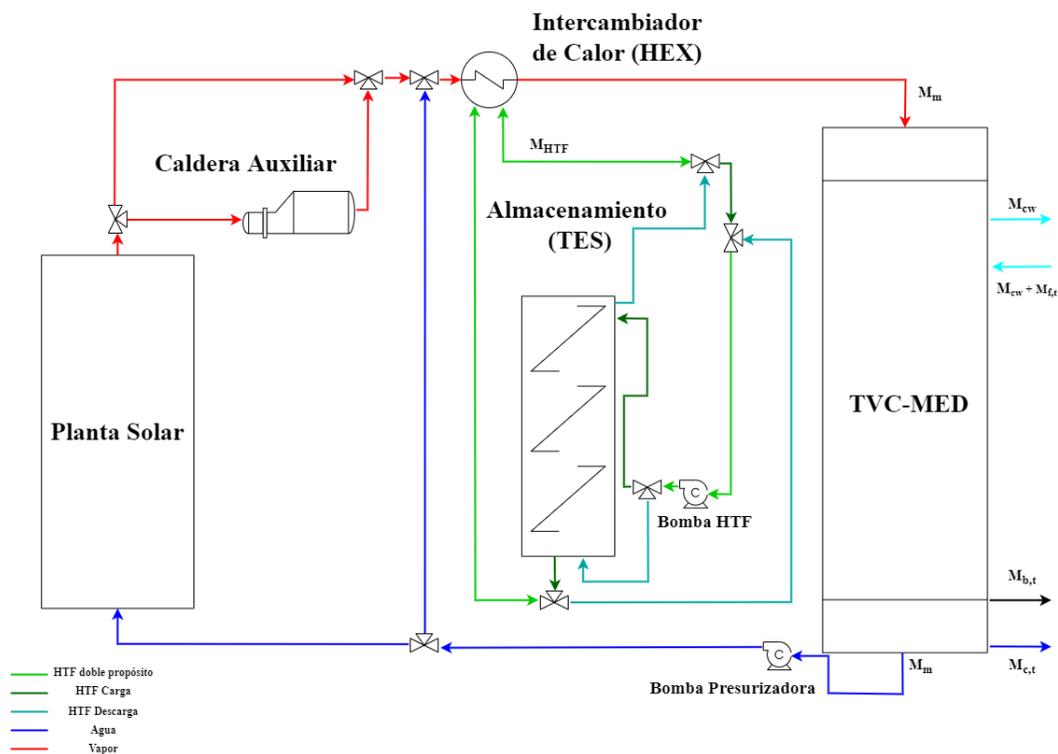


Figura 4.10: Esquema de interacción entre ambas plantas [EP].

Para dimensionar el calor necesario para el funcionamiento del sistema desalador, se introduce la ecuación 4.58, en la cual se consideran las entalpías de entrada y salida del sistema desalador, así como su flujo másico.

$$\dot{Q} = M_m \cdot (h_{out,m} - h_{in,m}) \quad (4.58)$$

El flujo de calor obtenido permite calcular un parámetro crucial para el dimensionamiento de la planta solar: el área de apertura de los colectores.

Considerando la ecuación anterior, se presenta la ecuación que permitirá calcular el área de apertura de los colectores:

$$\dot{Q} = \eta_{opt} \cdot DNI \cdot A_{colectores} \quad (4.59)$$

Donde η_{opt} corresponde a la eficiencia óptica del colector utilizado y $A_{colectores}$ al área total de los colectores. El término que bastaría despejar es el de DNI , correspondiente a la radiación directa horizontal y la cual, dependiendo de la época del año, varía fuertemente. Este dato puede ser obtenido de manera directa a partir del explorador solar [16].

Se le llama preliminar a este cálculo debido a que corresponde al dimensionamiento sin considerar el almacenamiento térmico de la planta. Este, al necesitar de un flujo calórico para su carga, aumenta necesariamente el área de captación.

4.4.2. Dimensionamiento del almacenamiento térmico

Considerando que el sistema debe proveer calor durante las 24 [hrs] para el funcionamiento íntegro de la planta, se procederá a dimensionar con un DNI pesimista, correspondiente a los meses de baja radiación. Según el Registro Solarimétrico de la UTFSM [47], los meses correspondientes de abril a septiembre pueden considerarse como meses invernales, presentando una menor cantidad de horas de Sol, las cuales son -en promedio- 10. Teniendo en cuenta, por ende, un total de 14 [hrs] de noche, se debe dimensionar para que el almacenamiento logre proporcionar el calor necesario para mantener el estado estacionario de los flujos de la planta de desalinización.

Es en busca de esto que se introduce el término de múltiplo solar (SM), el cual se define a la potencia térmica que necesita el bloque de consumo (la planta desalinizadora en este caso).

$$SM = \frac{\text{Capacidad de captura térmica del campo solar}}{\text{Potencia necesaria para el funcionamiento}} \quad (4.60)$$

Es a través de este término que se debe redimensionar el área de apertura del campo solar, considerando que del calor preliminar calculado anteriormente se obtiene el total necesario para cargar el almacenamiento y hacer funcionar el sistema desalador, $\dot{Q}_{tot} = SM \cdot \dot{Q}$. Este nuevo flujo de calor permite obtener el área total de apertura utilizando la ecuación 4.59, ya que tanto la eficiencia como la radiación se mantienen iguales.

Como se explicó en la sección de Antecedentes del presente trabajo, los sistemas de almacenamiento que existen hoy en día son bastante abundantes y variados. Sin embargo, estos permiten ser organizados en tres grupos principales, dependientes de la forma en la que almacenan el calor: por calor sensible, calor latente o termoquímico reversible. Debido a que cada uno basa su funcionamiento en un fenómeno termodinámico diferente, se debe escoger uno de estos para poder hacer el análisis termodinámico y dimensionar el sistema final; sin perjuicio de que existen sistemas híbridos, pero estos se descartan por estar en etapas experimentales aún.

De los tres grupos característicos, solo los dos primeros están en etapas maduras de desarrollo y, por ende comercializables. El sistema termoquímico reversible, sin perjuicio de ser muy pro-

metedor, aún se mantiene en etapa de desarrollo experimental [48], por lo que se descarta para su utilización.

Comparando ambos sistemas restantes, es crucial tener en cuenta diferentes puntos claves. En específico, se deben cumplir una cierta cantidad de criterios que permitan escoger la tecnología más adecuada para la instalación. Entre estos destacan una alta capacidad de almacenamiento (alto calor sensible o latente), larga vida útil, baja reactividad, baja toxicidad, bajo costo de materiales (alta disponibilidad), estabilidad cíclica en el tiempo, entre otros [13].

Hoy en día existen muchas menos opciones del lado de la tecnología por calor latente para los altos gradientes de temperatura que se registran en los concentradores solares. Esto se debe a que, para que esta tecnología sea útil, el material utilizado para almacenar energía debe cambiar de fase en un rango de calor específico, limitando, por ende, la variación de temperatura que puede experimentar el *HTF*.

Por esta razón, la basta mayoría de las aplicaciones de las tecnologías por medio de calor latente son utilizadas para baja temperatura (<100 [°C]). En cuanto a las aplicaciones de media y alta temperatura existen opciones, no obstante, hoy en día mantienen precios bastante altos, además de estar en etapas no comercializables a gran escala [48].

Considerando lo anterior, se escoge mantener la elección mas común con respecto a la tecnología de almacenamiento térmico, esto es, la tecnología por calor sensible. Esta, además de estar en etapas de desarrollo muy altas, posee una amplia variedad de opciones para todos los rangos de temperatura de operación. Por lo mismo, facilita la comparación y elección de un concepto de almacenamiento.

Como su nombre indica, este tipo de tecnología almacena calor en forma de calor sensible, es decir, en el aumento y disminución de la temperatura de un material. Lo anterior depende directamente del calor específico de cada material en cuestión, el cual varía con la temperatura en mayor o menor medida. En términos simples, el calor sensible teórico está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sensible} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fin} - T_{inicio}) \quad (4.61)$$

Donde C_p representa el calor específico del material en cuestión.

Utilizando esta ecuación se puede calcular la cantidad de calor que transmite el fluido caloportador al sistema de almacenamiento y, haciendo una comparación pertinente de cada tipo de concepto de almacenamiento con los criterios anteriormente mencionados, se puede escoger la tecnología adecuada para almacenar la energía térmica y lograr el funcionamiento de la planta durante las horas deseadas (24 en este caso).

Para poder escoger de buena manera una tecnología almacenadora, se debe hacer una comparación entre diferentes parámetros clave que están involucrados en su funcionamiento. Como se comentó anteriormente, sólo se analizarán conceptos por calor sensible, los cuales se pueden separar en dos categorías según el tipo de material: líquidos o sólidos.

No es directo que la solución más efectiva desde el punto de vista termodinámico sea la que se

escogerá, debido a la amplia cantidad de parámetros comparables se debe dar un peso a cada uno, lo que de proyecto a proyecto cambiará la decisión final. En razón de lo anterior, a la hora de tomar una decisión final son parámetros relevantes ciertos indicadores como el coste, la disponibilidad de materiales, la madurez de la tecnología, la dificultad de aplicación, la volatilidad o toxicidad, entre otros.

En este caso los principales parámetros a considerar son el coste del sistema, la toxicidad (no se quiere contaminar el agua del salar), la volatilidad (evitar incendios) y la disponibilidad del producto (asociado a costes). Ahora, dado que actualmente no existe un sistema de almacenamiento comercial que pueda tomar el calor del vapor producido directamente en los colectores y almacenarlo, se hace necesario considerar un sistema intercambiador entre un *HTF* y el vapor obtenido. A partir de aquí, debido a que los aceites térmicos que se podrían ocupar tienen capacidades calóricas menores que el agua, las temperaturas y flujo másico de estos están obligados a ser mayores. En la figura 4.11 se pueden apreciar los rangos de temperaturas características en los que trabajan ciertos materiales de almacenamiento de calor sensible.

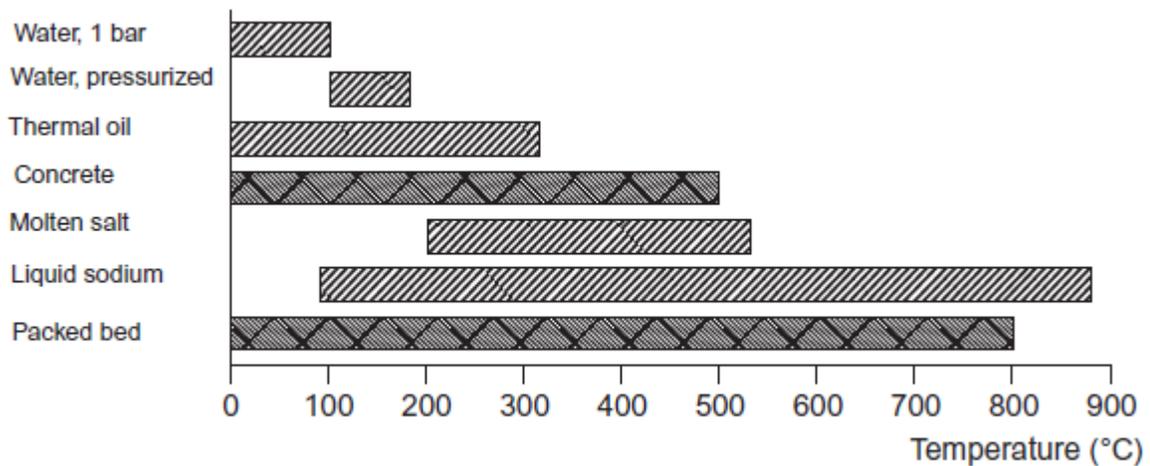


Figura 4.11: Temperaturas características de algunos conceptos de almacenamiento térmico sensible [11].

Escogido el concepto de almacenamiento correspondiente, se procederá a calcular los calores de carga y descarga del mismo. Estos se reconocen distintos ya que la transferencia de calor dentro del almacenamiento no es perfecta, lo que se debe a pérdidas de calor con el medio ambiente y otras fuentes parásitas a las que se les transfiere calor de manera indeseada, en especial en la descarga del calor. Para poder dimensionar estas pérdidas se introduce la eficiencia $\eta_{descarga}$, que caracteriza las pérdidas de la descarga; esta depende del concepto escogido. Así, los flujos de calor de carga y descarga se calculan como sigue:

$$\dot{Q}_{carga} = \dot{Q}_{tot} - \dot{Q} \quad (4.62)$$

$$\dot{Q}_{descarga} = \eta_{descarga} \cdot \dot{Q}_{carga} \quad (4.63)$$

En donde Q_{carga} corresponde al calor entregado por el vapor en el intercambiador de calor al fluido caloportador.

4.4.3. Dimensionamiento del intercambiador de calor

Para dimensionar este equipo, se presentarán las ecuaciones características que permitirán calcular el flujo másico que pasará por el intercambiador, así como la variación de temperatura que sufrirá el fluido caloportador. La primera considera las entalpías de cada flujo que interactúa dentro del intercambiador al momento de ingreso y salida, mientras que la segunda considera el calor de carga del almacenamiento. La ecuación 4.64 queda entonces:

$$M_{HTF} = M_{m,HEX} \cdot \frac{h_{out,m} - h_{in,m}}{h_{in,HTF} - h_{out,HTF}} \quad (4.64)$$

Con M_{HTF} en $[\frac{kg}{s}]$.

Mientras, la ecuación 4.65 queda:

$$\Delta T_{HTF} = \frac{\dot{Q}_{carga}}{C_{p,HTF} \cdot M_{HTF}} \quad (4.65)$$

Se debe considerar que el vapor de agua saturado que pasa por el intercambiador de calor para calentar el flujo de HTF , es un flujo separado del que va hacia el sistema desalador, volviendo al campo solar luego de pasar por el HEX . Este tiene su propio flujo másico, calculable con el calor de carga y las entalpías del agua saturada, y debe ser sumado al total de flujo másico del sistema completo.

4.4.4. Dimensionamiento de la caldera auxiliar

Si bien los sistemas solares pueden proporcionar la energía suficiente por si solos para hacer funcionar a un bloque de potencia determinado, se hace necesario hibridarlas, usualmente, con un sistema de caldera auxiliar basado en combustibles fósiles. Esto se debe a que, aunque se pueda diseñar actualmente para un máximo de almacenamiento cercano a las 20 [hrs] (limitado por la economía de la planta)[49], los cambios estacionales pueden generar bajas de potencia inesperadas que disminuyan la eficiencia o incluso detengan el funcionamiento de la planta solar y, por ende, del bloque de potencia.

Tales funcionamientos inestables son indeseados ya que generan bajas en el rendimiento total de la planta, entregando menores potencias térmicas que las diseñadas nominalmente y aumentando el costo de la producción del bloque de potencia en general. Por lo mismo, para la planta diseñada se plantea introducir un sistema auxiliar, tal como puede verse en la figura 4.10, el cual estará encargado de entregarle la energía necesaria al fluido caloportador cuando los colectores solares no puedan, independiente del motivo.

Para poder diseñar la caldera como tal, es necesario asumir una potencia nominal que sea, por lo menos, igual a la potencia total necesaria calculada anteriormente. Lo anterior se debe a que, si los colectores no pueden funcionar durante todo el día, la caldera deberá entregar la energía necesaria para el funcionamiento durante las 24 [hrs]. Así, se podrá diseñar para cualquier escenario eventual, incluyendo entregar un apoyo a la carga del sistema de almacenamiento o cubrir el paso repentino de una nube que obstruya la radiación directa sobre los colectores.

Considerando esto último, se tiene que el flujo másico de combustible que tendrá la caldera está dado por M_{comb} y se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{Q}_{tot} = \eta_{comb} \cdot M_{comb} \cdot H_v \quad (4.66)$$

Donde η_{comb} es la eficiencia de la caldera y H_v el valor calorífico del combustible.

Teniendo aquel dato se puede estimar, dependiendo del porcentaje de días nublados y energía faltante en meses de invierno, la cantidad de combustible a utilizar durante un año característico.

4.4.5. Elección de la tecnología colectora y dimensionamiento final

A partir de las estimaciones hechas en las secciones anteriores, se puede calcular el área aproximada de apertura de los colectores, así como la temperatura a la que el fluido caloportador estará sometido dentro de ellos. Considerando esto, y teniendo en cuenta además los costos de capital que significa la implementación de cada tecnología colectora, se puede hacer una evaluación multifocal que permita seleccionar la tecnología de concentración más adecuada para el caso.

Para los efectos de concretar lo anterior, es fundamental tener presente diferentes fuentes bibliográficas que permitirán hacer juicios de valor con respecto a cada tecnología y su capacidad para funcionar en conjunto con la planta diseñada. Así, se debe optimizar la tecnología de manera que se disminuyan los costos de capital y operación, permitiendo el funcionamiento constante de la planta de desalinización.

Una vez seleccionada la tecnología adecuada se procederá a escoger, dentro de las posibilidades comercialmente disponibles, las dimensiones adecuadas para los colectores. Esto se hará basándose en un criterio de reducción de costos, así como de confiabilidad y seguridad en la operación a largo plazo; entregando, por ende, la opción óptima según lo analizado.

Con posterioridad a la selección de la tecnología reflectora (los espejos), es necesario seleccionar el receptor principal del mismo. Este corresponde al sistema de tubos (o tubo) que recibirá, en su punto focal, la energía concentrada de la radiación solar. Al igual que la parte reflectora del sistema, los receptores son variados, presentando diferentes características que los hacen aplicables de mejor o menor manera a cada caso específico. De manera similar, se deberá seleccionar esta parte del sistema por medio de un análisis cualitativo y cuantitativo de una cierta cantidad de receptores del mercado. Estos deberán, por tanto, ser útiles para la aplicación en cuestión y proporcionar una eficiencia adecuada, así como un balance económico factible.

Finalmente, cuando se tenga 100% seleccionada la tecnología a aplicar, se utilizará el software gratuito SAM [50] para dimensionar de mejor manera todo el sistema. Este ajustará, adecuadamente, las eficiencias según las dimensiones y características de las tecnologías escogidas. Es, por tanto, este software el que permitirá entregar un cálculo final del campo solar y del almacenamiento, abriendo paso al proceso de factibilidad económica de la planta completa.

5.1. Validación

5.1.1. Validación por comparación numérica

Una vez comprobado el funcionamiento del modelo de la planta construido en Matlab, es necesario asegurarse de que los datos que arroja como resultado son lógicos, físicamente hablando; es decir, que tengan un sentido real y aplicable. Para lograr esto, se procede a realizar una comparación empírica de los valores entregados por plantas reales que se parezcan, en su mayor parte, a la planta modelada.

Primeramente, se extraen los valores de entrada de cada uno de los casos, buscando que la mayoría de ellos sean aplicables al modelo creado; esto es, que sea el mismo dato que puede ingresarse al modelo. En algunos casos, debido a que el valor necesario para el modelo no es un dato de entrada para el caso real, se debe usar algún dato de resultado de este último o hacer una estimación de lo que podría ser para lograr la comparación.

Otro punto a considerar es que no todos los datos son comparables para todos los casos, ya que en algunas de las plantas estudiadas, simplemente, no se considera ese valor. Así, para esa comparación en particular, no existe un punto de referencia. Consideradas estas salvedades, se expone en la tabla 5.1 los resultados de la validación numérica del modelo computacional.

En la tabla se puede apreciar que los valores que entrega el modelo creado se condicen de buena manera con los valores de entrada de las plantas reales. Los errores que entrega cada uno de los datos de performance relevantes en ningún caso supera mas del 100%, mostrando por tanto una aproximación que, si bien a veces no es muy cercana, no posee desviaciones de más de una orden de magnitud, comprobando lo aplicable del modelo. Sumado a esto, considerando que algunos de los datos de entrada tuvieron que ser supuestos, que los errores sean relativamente bajos refuerza aún mas la capacidad de predecir del modelo.

Haciendo un análisis mas particular de cada planta, se puede ver como, por ejemplo, en la planta

4 los errores con respecto al diseño del TVC son bastante pequeños en lo que respecta al *CR* y al *ER*, mientras que en el *Ra* sucede todo lo contrario, siendo, incluso, el error más grande de toda la tabla. Esto se da debido a la manera en que se calcula ese parámetro en el modelo creado, el cual en este caso en particular no logra simular de una manera muy cercana al caso real.

Otro de los casos interesantes a analizar es el de la planta 7, en la cual, si bien los valores del diseño del TVC se mantienen relativamente cercanos, los valores de rendimiento tienden a distar más. Esto se produce debido a que el modelo involucra, dentro de su formulación, la presencia de precalentadores del flujo de alimentación, lo cual no sucede en el caso de la planta. Esto genera, por ende, un mayor rendimiento y menor necesidad de consumo calórico, así como una mayor área debido al aumento en cantidad de equipos.

Tabla 5.1: Tabla de validación numérica del modelo creado [EP].

| Planta desalinizadora | 1. [51] | | | 2. [52] | | | 3. [53] | | | 4. [46] | | | |
|--|--------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | Real | Modelo | Error | Real | Modelo | Error | Real | Modelo | Error | Real | Modelo | Error | |
| <i>Condiciones de diseño y operación</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Número de efectos | <i>n</i> | 4 | 4 | 12 | 12 | | 4 | 4 | | 4 | 4 | | |
| Producción de salmuera final | $M_{b,f} [\frac{kg}{s}]$ | N/A | 108,38 | N/A | 146,02 | | N/A | 105,87 | | N/A | 100,51 | | |
| Presión del vapor motor | $P_m [kPa]$ | 1,680 | 1,680 | 4,500 | 4,500 | | 550 | 550 | | 2,300 | 2,300 | | |
| Salinidad del agua de alimentación | $X [ppm]$ | N/A | N/A | 38,000 | N/A | | 36,000 | N/A | | 39,000 | N/A | | |
| Salinidad de la salmuera final | $X_b [ppm]$ | N/A | 45,000 | 57,000 | 57,000 | | 51,600 | 51,600 | | 53,000 | 53,000 | | |
| Temperatura de vapor de calentado | $T_s [^{\circ}C]$ | 65 | 65 | 65 | 65 | | 65 | 65 | | 65 | 65 | | |
| Temperatura del último efecto | $T_{b,n} [^{\circ}C]$ | 45,7 | 45,7 | 37 | 37 | | 51,8 | 51,8 | | 45,4 | 45,4 | | |
| Temperatura del agua de enfriamiento | $T_{cw} [^{\circ}C]$ | 29 | 29 | 22 | 22 | | 25 | 25 | | 31,5 | 31,5 | | |
| Flujo másico del vapor motor | $M_m [\frac{kg}{s}]$ | N/A | 8,8 | 6,25 | 6,25 | | N/A | 8,8 | | 8,8 | 8,8 | | |
| <i>Diseño del TVC</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Razón de arrastre | <i>Ra</i> | 0,875 | 1,06 | 21 % | N/A | 6,74 | N/A | 1,07 | 0,98 | 8 % | 0,67 | 1,29 | 93 % |
| Razón de compresión | <i>CR</i> | 2,58 | 2,57 | 0,39 % | 4 | 4,09 | 2 % | 1,87 | 1,9 | 2 % | 2,6 | 2,61 | 0,38 % |
| Razón de expansión | <i>ER</i> | 173,3 | 170,1 | 2 % | 730 | 725,04 | 0,68 % | 41 | 41,21 | 0,51 % | 238,6 | 237,44 | 0,49 % |
| <i>Rendimiento del sistema</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Gained Output Ratio | <i>GOR</i> | 6,67 | 7,39 | 11 % | 16,7 | 14,01 | 16 % | 8,42 | 7,22 | 14 % | 6,6 | 6,85 | 4 % |
| Área de transferencia específica | $A [m^2 \frac{kg}{s}]$ | 216 | 293,64 | 36 % | N/A | 1140,08 | N/A | 341,7 | 551,06 | 61 % | 251 | 311,18 | 24 % |
| Consumo de calor específico | $Q [\frac{kJ}{kg}]$ | N/A | 256,93 | N/A | N/A | 116,03 | N/A | N/A | 285,18 | N/A | N/A | 268,78 | N/A |
| <i>Planta desalinizadora</i> | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Condiciones de diseño y operación</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Número de efectos | <i>N</i> | 4 | 4 | 6 | 6 | | 12 | 12 | | | | | |
| Producción de salmuera final | $M_{b,f} [\frac{kg}{s}]$ | N/A | 141,63 | N/A | 163,56 | | N/A | 202,75 | | | | | |
| Presión del vapor motor | $P_m [kPa]$ | 2,100 | 2,100 | 2,500 | 2,500 | | 2,500 | 2,500 | | | | | |
| Salinidad del agua de alimentación | $X [ppm]$ | 36,000 | N/A | 36,000 | N/A | | 41,200 | N/A | | | | | |
| Salinidad de la salmuera final | $X_b [ppm]$ | 53,300 | 53,300 | 53,000 | 53,000 | | N/A | 65,920 | | | | | |
| Temperatura de vapor de calentado | $T_s [^{\circ}C]$ | 67 | 67 | 66,8 | 66,8 | | 72,1 | 72,1 | | | | | |
| Temperatura del último efecto | $T_{b,n} [^{\circ}C]$ | 47 | 47 | 42,8 | 42,8 | | 46,5 | 46,5 | | | | | |
| Temperatura del agua de enfriamiento | $T_{cw} [^{\circ}C]$ | N/A | 30 | 30 | 30 | | 30 | 30 | | | | | |
| Flujo másico del vapor motor | $M_m [\frac{kg}{s}]$ | 12,3 | 12,3 | 10,6 | 10,6 | | 6,8 | 6,8 | | | | | |
| <i>Diseño del TVC</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Razón de arrastre | <i>Ra</i> | 1,97 | 1,22 | 38 % | 1,36 | 1,8 | 32 % | 1,33 | 1,95 | 47 % | | | |
| Razón de compresión | <i>CR</i> | 1,61 | 2,63 | 63 % | N/A | 3,24 | N/A | 2,99 | 3,39 | 13 % | | | |
| Razón de expansión | <i>ER</i> | 124 | 199,89 | 61 % | N/A | 295,15 | N/A | 247,52 | 245,82 | 0,69 % | | | |
| <i>Rendimiento del sistema</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Gained Output Ratio | <i>GOR</i> | 7,5 | 6,91 | 8 % | 8,6 | 9,26 | 8 % | 15,04 | 17,89 | 19 % | | | |
| Área de transferencia específica | $A [m^2 \frac{kg}{s}]$ | 221 | 284,5 | 29 % | N/A | 422,25 | N/A | 971,24 | 1762,7 | 81 % | | | |
| Consumo de calor específico | $Q [\frac{kJ}{kg}]$ | N/A | 269,12 | N/A | N/A | 195,25 | N/A | 161,11 | 103,66 | 36 % | | | |

5.1.2. Validación por sensibilidad

Otra de las formas de validar si el modelo es correcto, es analizando la respuesta de este frente a cambios específicos en sus valores. Para realizar este análisis, se procede a tomar los datos de la planta que se considera mejor modelada. En este caso, esta corresponde a la planta 2, la cual

mantiene una relación muy cercana con lo que arroja el algoritmo creado y, además, presenta un alto número de efectos, lo que permite hacer un análisis más exhaustivo.

En primer lugar, es necesario visualizar el cambio de ciertos parámetros claves con el número de efectos. En específico, se busca revisar cómo cambia la concentración salina, la temperatura de los flujos y el flujo másico de salmuera concentrada. Estos tres parámetros pueden verse en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

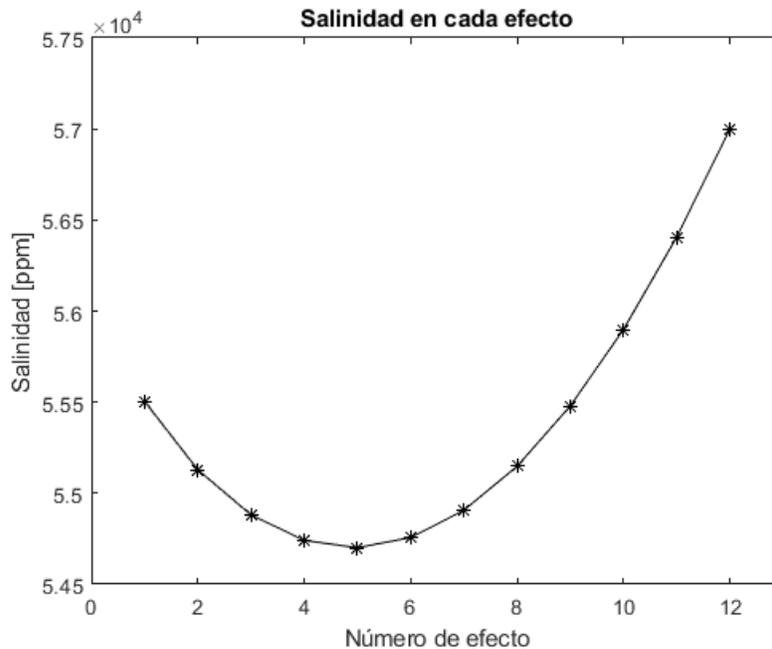


Figura 5.1: Variación de la concentración de salmuera según número de efecto [EP]

A partir del análisis de estos tres gráficos, se comprueba lo que era esperado según el comportamiento de cada parámetro. En primer lugar, se nota claramente cómo a medida que aumentan los efectos la temperatura de los flujos va disminuyendo; comportamiento esperado ya que cuando se avanza en los efectos, la temperatura de evaporación va disminuyendo por la baja en la presión.

Asimismo, la salinidad que se acumula tiende a disminuir en un principio, mientras que aumenta al acercarse a los últimos efectos. Esto se da debido a que ella se encuentra ligada fuertemente al flujo másico producido en cada efecto; considerando que el vapor producido se asume como libre de salinidad. Es más, analizando la figura 5.3 se puede apreciar cómo la tendencia del gráfico es casi opuesta al de salinidad, desfasándose por un efecto. Ahora, teniendo en cuenta la ecuación 4.30, se puede entender cómo, a medida que aumentan los efectos, la salinidad se comporta de tal manera; sabiendo, además, que la salinidad de alimentación en cada efecto es la misma y que cada efecto captura el flujo de salmuera del efecto anterior.

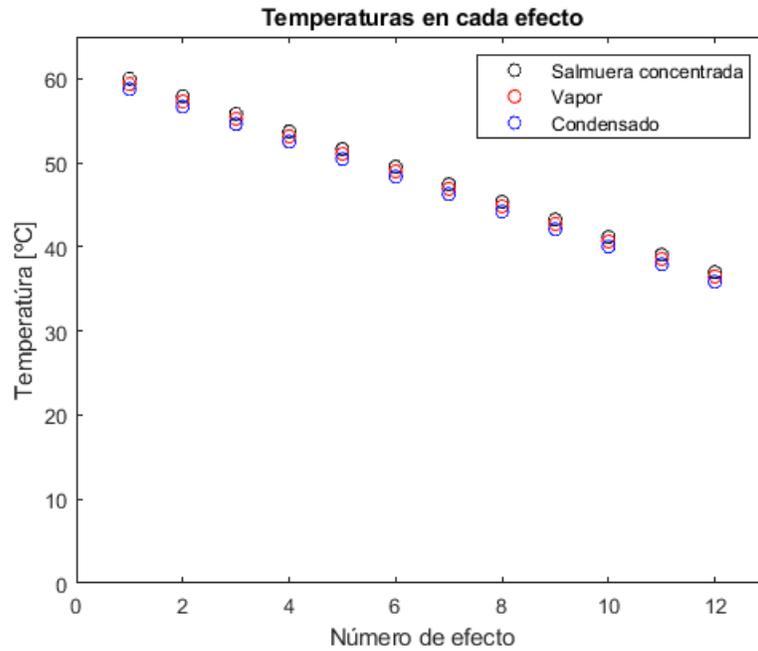


Figura 5.2: Variación de las temperaturas de los flujos según número de efecto [EP]

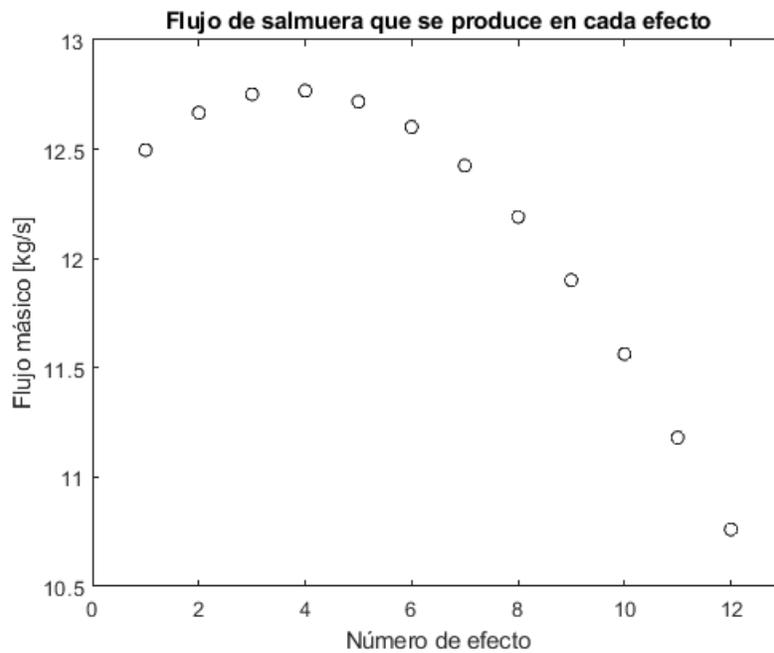


Figura 5.3: Variación del flujo másico creado de salmuera concentrada según número de efecto [EP]

Habiendo comprendido el funcionamiento general de estos tres valores clave, se procede a hacer un análisis exhaustivo del comportamiento físico del modelo a medida que se varían algunos datos de entrada del mismo. Este análisis específico cobra importancia ya que permite entender los límites del modelo y saber, al mismo tiempo, si el sentido físico se mantiene en rangos de funcio-

namiento distinto.

Se presenta en la tabla 5.2 la variación de los flujos másicos de mayor importancia del modelo a medida que se aumenta el número de efectos del mismo, así como el parámetro de rendimiento GOR. En ella se comprende algo clave: a medida que el modelo aumenta su capacidad de efectos, el GOR dista cada vez más del número de los mismo; es bueno recordar que en los sistemas MED el GOR suele ser muy cercano al valor de este parámetro. Lo anterior indica que mientras más efectos sea posible instalar, mayor será el rendimiento general del sistema. Sin perjuicio de lo anterior, esto debe contrastarse eso si con el precio que esto acarrearía.

El segundo punto de relevancia en cuanto a su análisis es el aumento de los flujos en general. En este sentido, mayor número de efectos significa necesariamente un mayor flujo de alimentación y, por ende, mayor flujo de salmuera y condensado. Esto se debe a que, para poder mantener un balance másico adecuado entre efectos, se necesita de mayor flujo para cubrir los requerimientos de cada por uno de ellos. En otras palabras, se necesita de más flujo de alimentación para producir más producto, ya que la planta es más grande. Finalmente, es bueno notar que la última columna de la tabla ejemplifica que, independiente del número de efectos que se tenga, el balance másico siempre se mantiene.

Tabla 5.2: Comportamiento de los flujos másicos de alimentación, salmuera y condensado a medida que varía el número de efectos [EP].

| N | GOR | $M_{f,t} [\frac{kg}{s}]$ | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | $M_{c,t} [\frac{kg}{s}]$ | $M_{f,t}-(M_{b,t}+M_{c,t})$ |
|----------|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 3 | 3,33 | 55,51 | 34,69 | 20,82 | 0,00 |
| 4 | 4,48 | 74,63 | 46,64 | 27,99 | 0,00 |
| 5 | 5,64 | 93,95 | 58,72 | 35,23 | 0,00 |
| 6 | 6,81 | 113,44 | 70,9 | 42,54 | 0,00 |
| 7 | 7,98 | 133,11 | 83,19 | 49,92 | 0,00 |
| 8 | 9,18 | 152,93 | 95,58 | 57,35 | 0,00 |
| 10 | 11,58 | 193,03 | 120,64 | 72,39 | 0,00 |
| 12 | 14,02 | 233,64 | 146,02 | 87,62 | 0,00 |
| 14 | 16,48 | 274,7 | 171,69 | 103,01 | 0,00 |
| 18 | 21,47 | 357,81 | 223,63 | 134,18 | 0,00 |
| 22 | 26,5 | 441,68 | 276,05 | 165,63 | 0,00 |
| 26 | 31,54 | 525,61 | 328,51 | 197,1 | 0,00 |
| 30 | 36,53 | 608,86 | 380,53 | 228,33 | 0,00 |

Si bien en la tabla anterior se puede apreciar la variación del GOR, se introducen las figuras 5.4 y 5.5 con el objeto de analizar el comportamiento general del área específica de intercambio térmico y el calor específico de la planta. En ellas se pueden entender dos comportamientos bastante interesantes.

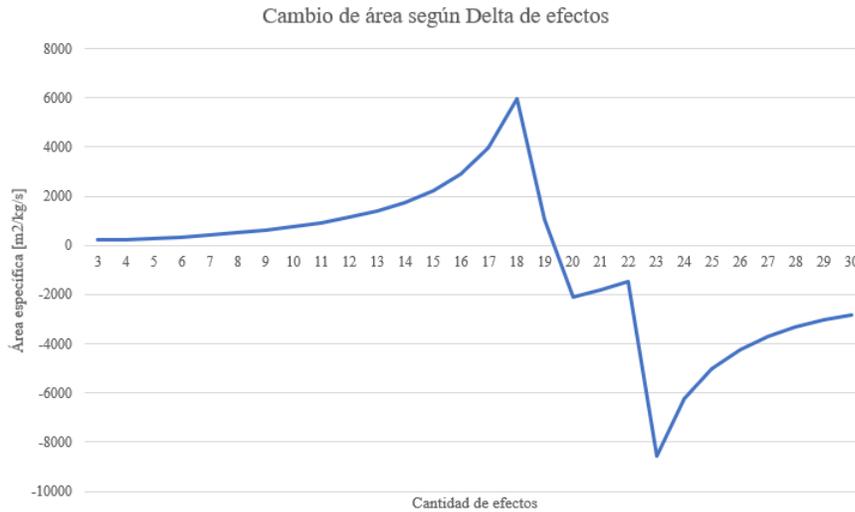


Figura 5.4: Variación del área específica total de intercambio térmico a medida que aumenta la cantidad de efectos [EP].

En la figura que caracteriza al área específica total, se logra entender algo clave: a medida que aumentan los efectos, el área de transferencia aumenta de manera exponencial hasta llegar a un punto físicamente inviable. El límite de este crecimiento está dado por dos cosas: (i) el aumento de la salinidad por efecto, el cual aumenta la temperatura de ebullición y; (ii) la disminución de la diferencia de temperaturas entre efectos, lo que hace eventualmente inviable la transmisión de calor del vapor generado en el efecto anterior al flujo de alimentación del efecto siguiente, entregando así áreas negativas. Por otro lado, el fenómeno del aumento exponencial del área se explica por lo anterior, ya que a medida que aumentan los efectos, la diferencia de temperaturas se hace más pequeña debido al aumento exponencial del BPE, necesitando, por ende, de mayor área para evaporar el flujo necesario.

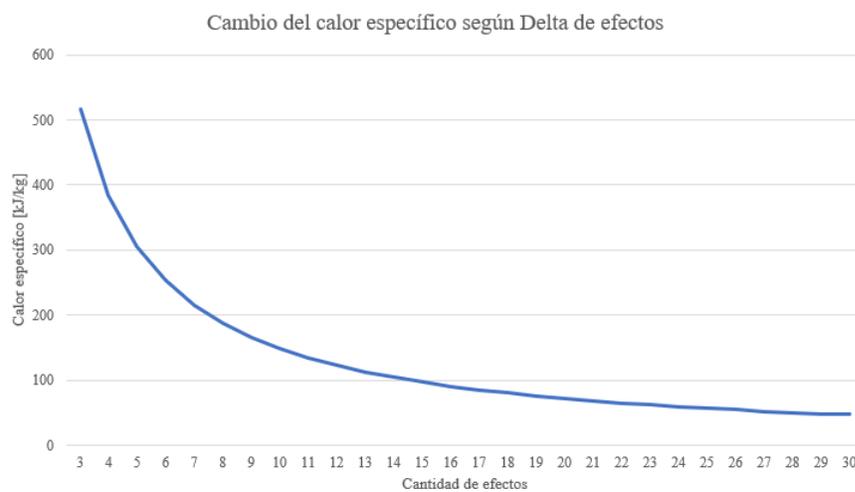


Figura 5.5: Variación del calor específico total a medida que aumenta la cantidad de efectos [EP].

Mientras que el área tiende a aumentar cuando se tienen más efectos disponibles en la planta, el calor específico tiende a disminuir de manera exponencial. Esto tiene sentido, ya que si se aumenta el número de equipos que intercambian calor de manera consecutiva, mejor se aprovecha el calor latente entregado por el termocompresor. Este gráfico no presenta una incongruencia física, ya que el calor específico solo depende del flujo de calor entregado y de la cantidad de producto generado, no así de las temperaturas entre efectos.

Considerando lo analizado en los dos gráficos, y sumado a lo que la tabla 5.2 entrega, es claro que se necesita buscar un punto óptimo entre el número de efectos a colocar que maximice el GOR, minimice el Q y mantenga un área físicamente (y económicamente) factible. De aquí se extrae también que la salinidad del flujo de alimentación toma una relevancia bastante importante a la hora de analizar la cantidad de efectos óptima, ya que el BPE pasa a ser una gran limitante; a mayor salinidad presente, menor es el número de efectos que se podrá instalar.

Otro de los parámetros cuya variación es importante analizar es la presión del vapor motor. La tabla 5.3 presenta un aumento constante de esta y la reacción de los parámetros de rendimiento más importantes, tanto de la planta general como del termocompresor.

Tabla 5.3: Variación de la presión del vapor motor y su influencia sobre el rendimiento [EP].

| P_m [kPa] | GOR | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | CR | ER | Ra |
|-------------|-------|--------------------------|-----------------------|------|--------|-------|
| 350 | 17,35 | 1.233,2 | 123,33 | 4,09 | 56,39 | 2,38 |
| 750 | 18,34 | 1.137,7 | 111,76 | 4,09 | 120,84 | 1,99 |
| 1200 | 19,19 | 1.137,1 | 103,31 | 4,09 | 193,34 | 1,76 |
| 1800 | 19,14 | 1.137,2 | 100,07 | 4,09 | 290,01 | 1,76 |
| 2200 | 18,35 | 1.137,6 | 102,37 | 4,09 | 354,46 | 1,98 |
| 2800 | 16,81 | 1.138,7 | 108,97 | 4,09 | 451,13 | 2,65 |
| 3400 | 15,48 | 1.139,8 | 115,56 | 4,09 | 547,81 | 3,72 |
| 3800 | 14,83 | 1.140,5 | 118,97 | 4,09 | 612,25 | 4,66 |
| 4500 | 14,02 | 1.141,3 | 122,86 | 4,09 | 725,04 | 6,74 |
| 5000 | 13,63 | 1.141,8 | 124,33 | 4,09 | 805,6 | 8,56 |
| 5500 | 13,35 | 1.142,1 | 125,013 | 4,09 | 886,16 | 10,66 |
| 6000 | 13,14 | 1.142,3 | 125,13 | 4,09 | 966,72 | 13,05 |

En primer lugar, se puede apreciar cómo el área y el calor no se ven particularmente afectados por la variación de la presión de saturación del vapor motor, mientras que el GOR puede variar de forma importante. Por otro lado, los parámetros de diseño del TVC tienen también una variación interesante: si bien el CR no varía, debido a que este no depende de la presión motora, el ER siempre va en aumento mientras que el Ra alcanza un óptimo. Mientras menor sea la razón de arrastre, mejor está funcionando el termocompresor, ya que se está aprovechando la energía que se introduce a partir de la fuente de calor de manera más eficiente. Se crea también una correlación fuerte entre el GOR y el Ra, dando a entender que mientras menor sea este último, mayor es el rendimiento general del sistema. Así, se recomienda siempre diseñar para la presión motora óptima que minimice Ra.

Para finalizar la validación por sensibilidad, se introducen dos variables que resultan interesan-

tes de analizar. En primer lugar, se muestra cómo se alteran los flujos principales y parámetros de rendimiento al variar la temperatura de aumento del flujo de alimentación en el condensador. Luego de esto, se presenta un gráfico que muestra de manera visual la variación del GOR a medida que se cambia la diferencia de temperatura entre el vapor caloportador del primer efecto y la temperatura de ebullición de la salmuera de este.

Tabla 5.4: Variación de parámetros clave a medida que varía la temperatura de aumento del fluido de alimentación [EP].

| $T_{f,n}-T_{cw}$ [°C] | GOR | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | $M_{f,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | $M_{b,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | $M_{c,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | M_{cw} |
|-----------------------|-------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|
| 2 | 12,74 | 1.158 | 135,15 | 212,4 | 132,75 | 79,65 | 383,5 |
| 4 | 13,04 | 1.153,1 | 132,1 | 217,34 | 135,84 | 81,5 | 403,75 |
| 6 | 13,35 | 1.148,6 | 129,01 | 222,51 | 139,07 | 83,44 | 424,97 |
| 8 | 13,68 | 1.144,7 | 125,94 | 227,94 | 142,46 | 85,48 | 447,23 |
| 10 | 14,02 | 1.141,3 | 122,86 | 233,64 | 146,03 | 87,61 | 470,61 |
| 12 | 14,38 | 1.138,6 | 119,79 | 239,64 | 149,77 | 89,87 | 495,2 |
| 14 | 14,75 | 1.137,9 | 116,71 | 245,95 | 153,72 | 92,23 | 521,09 |
| 16 | 15,16 | Nº Complejo | 113,64 | 252,61 | 157,88 | 94,73 | 548,4 |

En la tabla 5.4 se muestra cómo a medida que aumenta la diferencia de temperatura, aumenta el rendimiento del sistema. Esto se da ya que una mayor diferencia significa que se puede transmitir más calor entre el vapor del último efecto y la salmuera entrante, lo que permite aumentar la cantidad de producto final obtenido y por ende el rendimiento. Asimismo, aumentar esta diferencia mejora levemente el área total, disminuyéndola. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si se aumenta demasiado esta diferencia, la LMTD del condensador empieza a entregar números imaginarios debido a que esta diferencia no es físicamente posible, haciendo que el agua de alimentación le entregue calor al flujo del último efecto y no de manera opuesta.

En cuanto a los flujos, se debe poner especial atención en el flujo de salmuera extraída, la cual aumenta de manera importante a medida que la diferencia de temperatura en el condensador es más grande. Esto puede apreciarse de forma gráfica en la figura 5.6. Así, se recomienda mantener una diferencia moderada, en la cual se pueda extraer una cantidad de salmuera razonable y el área se mantenga en parámetros físicamente lógicos.

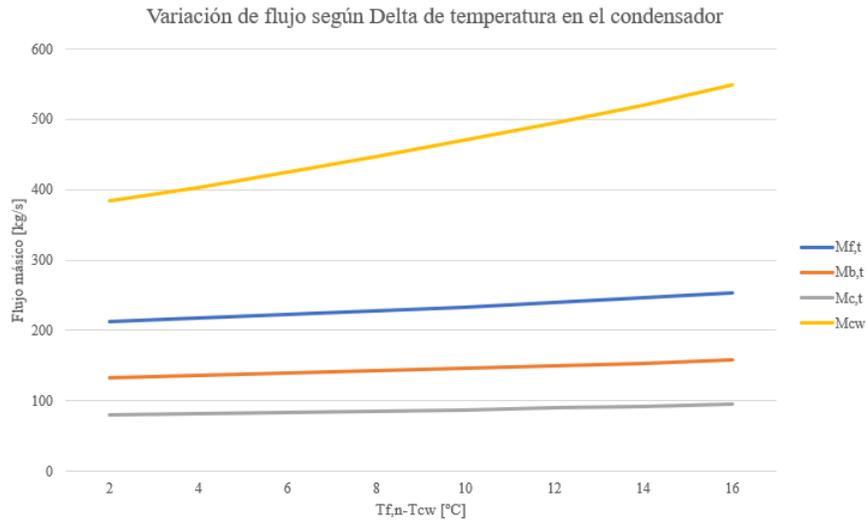


Figura 5.6: Variación de los flujos a medida que varía la temperatura en el condensador [EP].

En la figura 5.7, por otro lado, se entiende cómo la diferencia entre las temperaturas que interactúan en el primer efecto afectan de manera importante a todo el rendimiento del sistema. Mayor diferencia, necesariamente, implica que la transferencia de calor de la fuente externa no fue tan eficiente y como la generación de vapor de los efectos siguientes depende del primero, disminuye el rendimiento de toda la planta. Si bien es claro que fijar una menor temperatura en el modelo significa mayor rendimiento, no se encontró en la literatura evidencia de una diferencia menor a 5 [°C], por lo que algo menor que esto no parece viable con la tecnología actual.

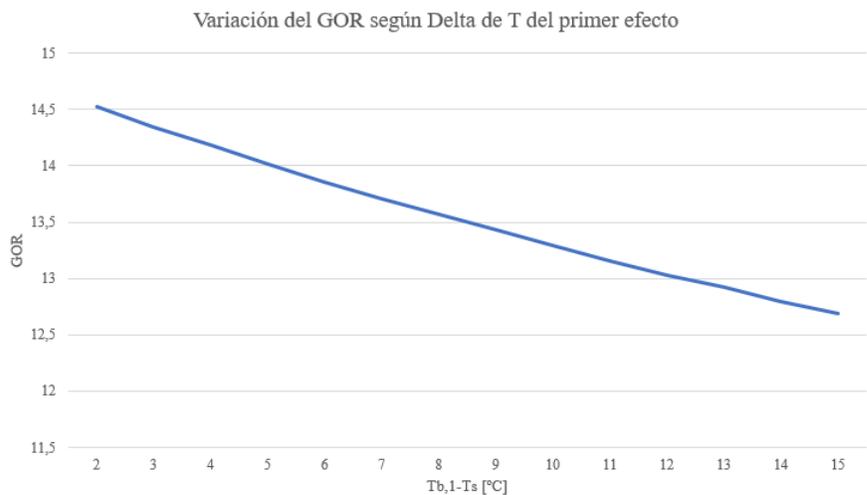


Figura 5.7: Variación del GOR a medida que aumenta la temperatura entre el vapor caloportador y la salmuera del efecto [EP].

5.1.3. Validación de ajuste de áreas

Ya validado el algoritmo principal, es necesario hacer una comparación entre lo que se obtiene con áreas variables de cada equipo, en contraste a lo que se obtiene tomando el promedio de estas.

Con esto, se comparan los errores que se generan para variados parámetros que se ven afectados por la redimensión, concluyendo si estos son lo suficientemente pequeños para aceptar dicho ajuste. Para ello, se utilizan los datos obtenidos a partir de la simulación de la planta 2.

Para calcular el área de los equipos a partir de los datos del modelo, se utilizan las ecuaciones presentadas en la sección de dimensionamiento de equipos. Así, se puede ver en las figuras 5.8 y 5.9 las áreas de cada uno de los efectos y precalentadores, respectivamente. Aquí, se puede apreciar cómo varían para cada componente, en consonancia a los flujos energéticos que cada uno maneja.

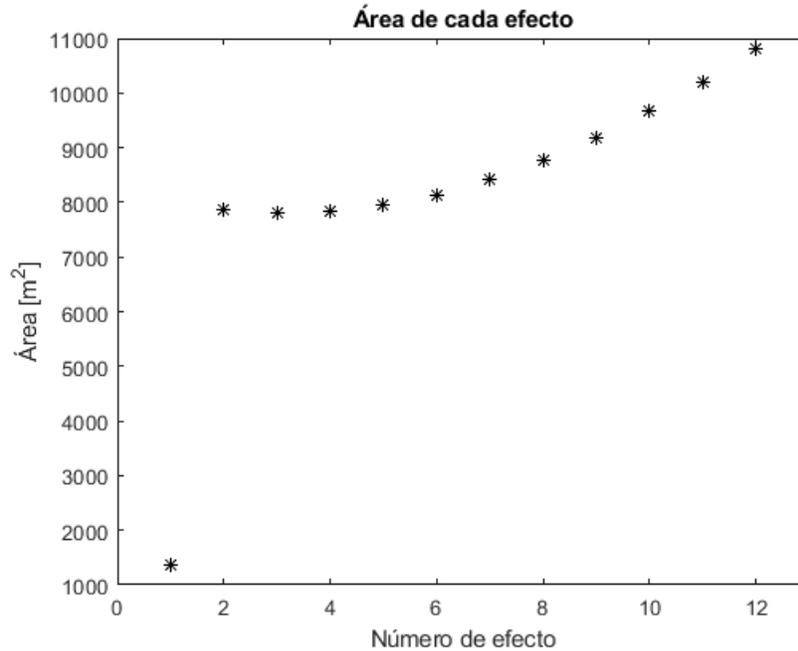


Figura 5.8: Área de cada efecto [EP].

Se aprecia de manera directa como todas las áreas obtenidas son diferentes entre si, generando un problema de aspecto logístico bastante importante. En primer lugar, realizar cotizaciones para áreas exactas no es algo viable, ya que los fabricantes suelen manufacturar a escalas estándar, no a pedido; siendo esta última opción mucho más cara. El otro gran inconveniente se deriva del primero; el costo de las instalaciones, el piping, el mantenimiento, entre otros aspectos, sube enormemente cuando no se tiene un área estandarizada ya que se necesita realizar un cálculo individual para cada componente diferente.

Considerando lo argumentado, se establece un promedio de áreas para cada efecto (a excepción del primero) y para cada precalentador. Las áreas presentadas para recalcular los parámetros involucrados se presentan en la tabla 5.5, en donde se puede ver lo promediado para los precalentadores y efectos, disminuyendo por ende la cotización de 2xn áreas diferentes a solo 4.

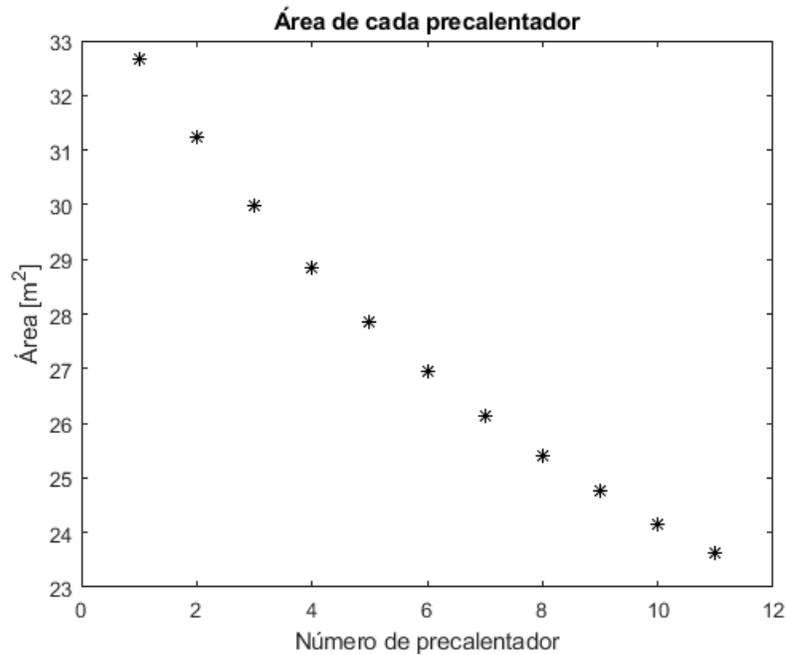


Figura 5.9: Área de cada precalentador [EP].

Tabla 5.5: Áreas promedio establecidas [EP].

| Equipo | Área [m ²] |
|---------------|------------------------|
| Primer efecto | 1.373 |
| Otros efectos | 8784,3 |
| Precalentador | 27,41 |
| Condensador | 1.695,3 |

Utilizando la ecuación 4.6 se recalcula la temperatura de los flujos de alimentación, con cuyos valores se procede a redimensionar los flujos máxicos y salinos de cada componente con las áreas promedio establecidas. Se compara cada valor obtenido a partir de este reajuste con los valores de áreas variables, produciendo una diferencia porcentual de la variación del valor.

Lógicamente, el primer valor a analizar es la temperatura de alimentación. En la figura 5.10 se puede ver el error asociado a cada valor y cómo varía este en cada uno de los efectos por los que pasa el flujo. Se destaca un comportamiento favorable, con un bajo error entre lo calculado con área variable y fija; cabe destacar que el último efecto corresponde a la temperatura proveniente del condensador, por lo que el error es de 0%. Así, se puede extraer que este método es favorable para recalcular las temperaturas obtenidas en un principio.

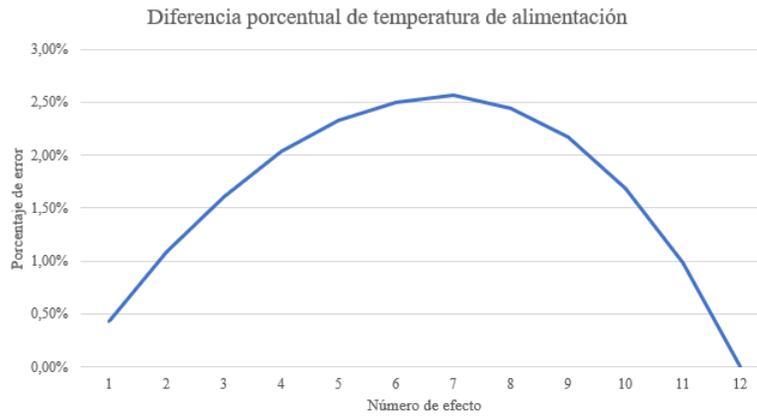


Figura 5.10: Error porcentual de las temperaturas de alimentación con área variable y fija [EP].

El siguiente paso a seguir es la comparación de los flujos que se ven afectados por esta redimensión, esto es, todos aquellos cuyo flujo calórico y másico dependa de estas variaciones. En primer lugar, se presentan las variaciones en los tres flujos principales: salmuera concentrada, vapor producido y condensado; correspondientes a las figuras 5.11, 5.12 y 5.13 respectivamente. Aquí, se aprecia cómo las diferencias varían en rangos positivos y negativos, debido principalmente a la toma del promedio del valor. Este subestima y sobrestima los flujos dependiendo de la distancia del promedio con el valor original, entregando por ende una compensación final de los valores en algunos casos.

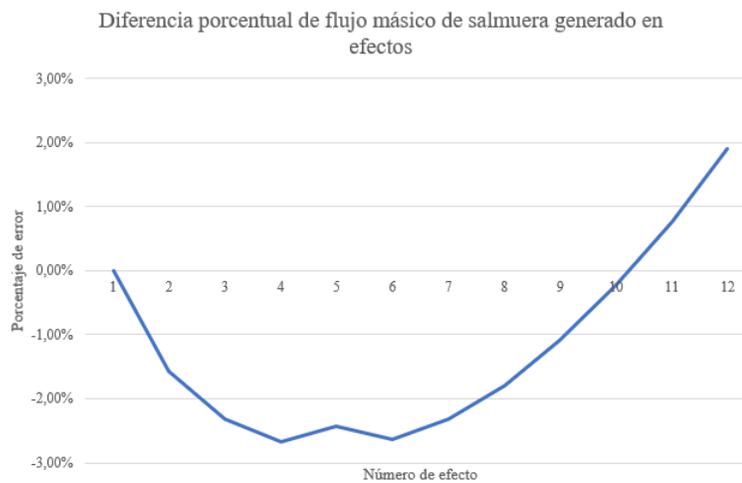


Figura 5.11: Variación del flujo másico de salmuera con área variable y fija [EP].

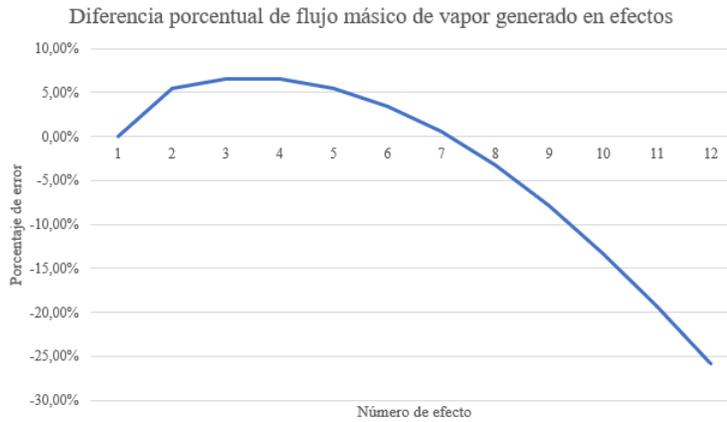


Figura 5.12: Variación del flujo másico de vapor producido con área variable y fija [EP].

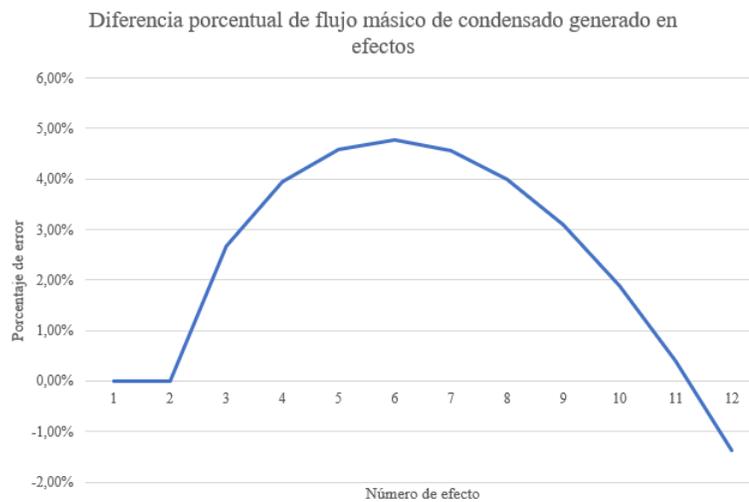


Figura 5.13: Variación del flujo másico de condensado con área variable y fija [EP].

Cuando se analiza cada figura de manera particular, se comprueba que tanto la diferencia en los flujos de salmuera como en el de condensado se mantienen en rangos relativamente controlados, sin superar en ningún momento el 5%. Se comprueba en estos casos que la imposición del área promedio como área fija de los efectos, no genera diferencias demasiado marcadas entre los flujos analizados. En el caso de la salmuera, esta depende fuertemente del flujo másico de alimentación, el cual se mantiene constante. Por otro lado, el flujo de condensado mantiene cierto balance ya que, si bien existen variaciones fuertes en el flujo de vapor producido y el vapor entrante a los precalentadores, estos vuelven a compensarse cuando el condensado se va almacenando a través de los efectos.

Por otro lado, la diferencia del flujo másico de vapor producido se mantiene relativamente controlada hasta el efecto 10, en el cual muestra una caída importante en su valor. Esto se da principalmente a la extracción de vapor generada por el termostato en el último efecto, así como la mayor necesidad de vapor dirigido hacia el calentamiento del flujo de alimentación a las nuevas tempera-

turas de alimentación utilizadas para los efectos. Dado lo anterior, la variación presentada en este caso entrega valores de mayor disparidad en la comparación. Aún así, y como se mostrará un poco más adelante, esto no genera variaciones importantes en los parámetros de rendimiento, por lo que se considera algo aceptable dentro del modelo.

Otro de los valores importantes a analizar es el del flujo másico que ingresa a los precalentadores, proveniente desde los efectos, el cual es el encargado de calentar el flujo de alimentación. En la figura 5.14 se logra identificar cómo existe una variación positiva cargada hacia los últimos efectos; esto refuerza lo explicado en el párrafo anterior. Si bien las variaciones son de un porcentaje importante, se comprueba a simple vista que existe una compensación entre ambas partes, pudiendo mantener el flujo global relativamente parecido, sin afectar el balance másico.

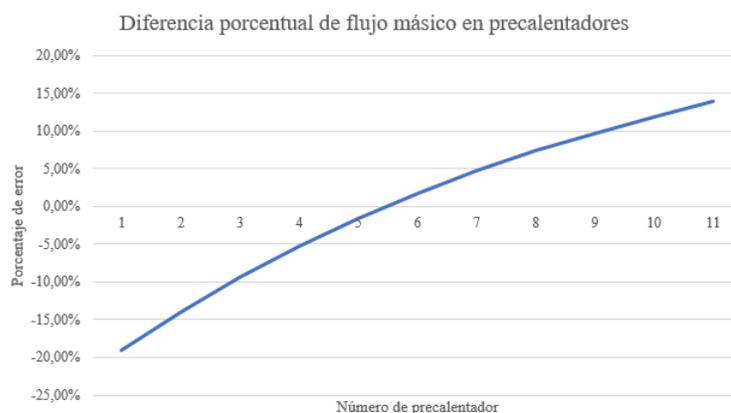


Figura 5.14: Variación del flujo másico en los precalentadores con área variable y fija [EP].

Los últimos valores a analizar son los de salinidad del flujo de salmuera producido y el valor del BPE del que depende este. Es intuitivo pensar que las variaciones de estos dos valores se moverán en conjunto, tal como se observa en las figuras 5.15 y 5.16, aún más cuando se mantiene la temperatura de la salmuera en cada efecto. Así, en estos dos gráficos se puede ver como las variaciones de los valores son relativamente pequeñas, nunca superando más de un 3%; esto es favorable para el análisis posterior, ya que significa que fijar un área no afectará demasiado las temperaturas a las que se evaporan los flujos de alimentación, manteniendo los parámetros de rendimiento en valores lógicos.

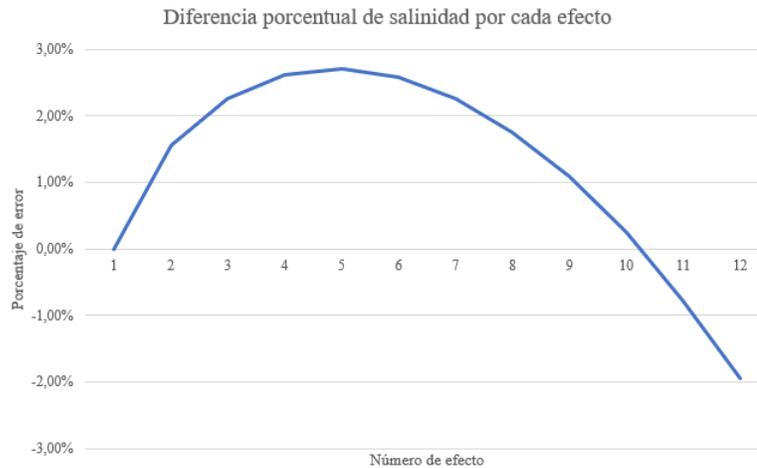


Figura 5.15: Variación del flujo salino en los efectos con área variable y fija [EP].

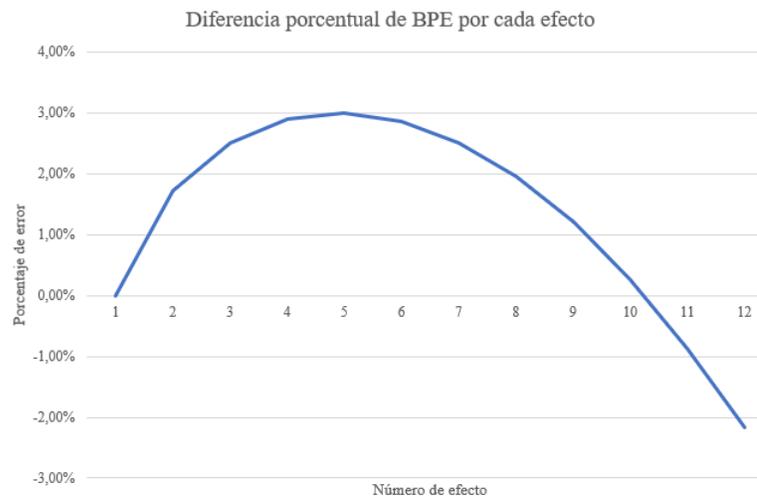


Figura 5.16: Variación del BPE en los efectos con área variable y fija [EP].

Por último, es necesario comparar cómo se mueven los valores relevantes de rendimiento (GOR y Q), así como los flujos totales obtenidos y el porcentaje de recuperación final, el cual no debe distar demasiado del valor impuesto en un principio. Así, se presentan los valores obtenidos en la tabla 5.6, junto con los errores asociados a cada uno. En ella, se puede ver que el error en ningún caso es mayor a un 4 %, entregando un panorama alentador para la redimensión planteada. Es más, se puede ver cómo se respeta el porcentaje de recuperación establecido en un principio, lo que significa que las nuevas áreas establecidas no afectan demasiado al modelo inicial.

Tabla 5.6: Tabla de variaciones de parámetros claves con área variable y fija [EP].

| Parámetro | Área fija | Área variable | Variación |
|-----------|-----------|---------------|-----------|
| GOR | 13,56 | 14,02 | 3,28 % |
| Q | 127 | 122,86 | 3,37 % |
| RR | 63,72 | 62,5 | 1,95 % |
| $M_{b,t}$ | 148,87 | 146,03 | 1,94 % |
| $M_{c,t}$ | 84,76 | 87,62 | 3,26 % |

En vista y considerando lo anterior, se comprueba que el procedimiento de ajuste de áreas es satisfactorio, entregando resultados lógicos y no muy distantes de aquellos calculados por el modelo principal. Se establece, por tanto, una manera directa y simple de dimensionar los equipos, ahorrando tiempo y dinero sin sacrificar demasiada precisión en el cálculo.

5.2. Modelamiento de la Planta *TVC-MED*

5.2.1. Análisis de casos de estudio

Se estableció un sistema comparativo entre los 30 casos generados con el objeto de seleccionar aquel que entregue los datos más favorables para la aplicación y permita establecer la factibilidad técnica de la planta. Considerando esto, se presentan a continuación 6 tablas comparativas, en la que cada una corresponde a una presión motora distinta, se varía el número de efectos en cada fila ordenando así los 30 casos.

Tabla 5.7: Tabla comparativa con $P_m = 350[kPa]$ [EP].

| P_m | 350 [kPa] | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|------|------|--------------------------|-----------------------|------|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR |
| 3 | 61,28 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | 286,02 | 517,77 | 4,13 |
| 4 | 82,11 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | 429,22 | 386,46 | 5,54 |
| 5 | 103,02 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | 903,85 | 308 | 6,95 |
| 6 | 124,01 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | 3.384,8 | 255,88 | 8,36 |
| 7 | 145,06 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | -2083,9 | 218,75 | 9,78 |

Tabla 5.8: Tabla comparativa con $P_m = 700[kPa]$ [EP].

| P_m | 700 [kPa] | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|--------|----|--------------------------|-----------------------|-------|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR |
| 3 | 64,39 | 4,16 | 144,16 | 2 | 282,07 | 474,19 | 4,34 |
| 4 | 86,27 | 4,16 | 144,16 | 2 | 426,27 | 353,93 | 5,82 |
| 5 | 108,24 | 4,16 | 144,16 | 2 | 901,42 | 282,08 | 7,3 |
| 6 | 130,29 | 4,16 | 144,16 | 2 | 3.382,8 | 234,34 | 8,78 |
| 7 | 152,4 | 4,16 | 144,16 | 2 | -2085,5 | 200,34 | 10,27 |

Tabla 5.9: Tabla comparativa con $P_m = 1550[kPa]$ [EP].

| P_m | 1550 [kPa] | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|--------|------|--------------------------|-----------------------|-------|--|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR | |
| 3 | 68,46 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | 277,42 | 420,7 | 4,62 | |
| 4 | 91,73 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | 422,8 | 314 | 6,18 | |
| 5 | 115,09 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | 898,73 | 250,26 | 7,76 | |
| 6 | 138,54 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | 3.380,5 | 207,9 | 9,34 | |
| 7 | 162,05 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | -2087,5 | 177,74 | 10,92 | |

Tabla 5.10: Tabla comparativa con $P_m = 2000[kPa]$ [EP].

| P_m | 2000 [kPa] | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|--------|------|--------------------------|-----------------------|-------|--|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR | |
| 3 | 66,5 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | 279,59 | 423,18 | 4,48 | |
| 4 | 89,09 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | 424,42 | 315,86 | 6 | |
| 5 | 111,79 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | 900,02 | 251,74 | 7,54 | |
| 6 | 134,56 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | 3.381,6 | 209,13 | 9,07 | |
| 7 | 157,39 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | -2086,6 | 178,78 | 10,61 | |

Tabla 5.11: Tabla comparativa con $P_m = 3000[kPa]$ [EP].

| P_m | 3000 [kPa] | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|--------|------|--------------------------|-----------------------|------|--|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR | |
| 3 | 57,63 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | 291,21 | 467,6 | 3,89 | |
| 4 | 77,22 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | 433,09 | 349 | 5,21 | |
| 5 | 96,89 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | 906,93 | 278,15 | 6,53 | |
| 6 | 116,62 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | 3.387,3 | 231,08 | 7,86 | |
| 7 | 136,42 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | -2081,7 | 197,55 | 9,19 | |

Tabla 5.12: Tabla comparativa con $P_m = 4500[kPa]$ [EP].

| P_m | 4500 [kPa] | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|--------|------|--------------------------|-----------------------|------|--|
| n | $M_{b,t} [\frac{kg}{s}]$ | CR | ER | Ra | A [$m^2/\frac{kg}{s}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR | |
| 3 | 49,42 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | 305,71 | 516,99 | 3,33 | |
| 4 | 66,21 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | 443,91 | 385,88 | 4,46 | |
| 5 | 83,07 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | 915,56 | 307,54 | 5,6 | |
| 6 | 99,99 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | 3.394,5 | 255,49 | 6,74 | |
| 7 | 116,97 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | -2075,5 | 218,42 | 7,89 | |

Analizando cada caso, se pueden extraer diferentes conclusiones. En primer lugar, se puede apreciar que el GOR, independiente de la tabla en la que se presente, siempre sube a medida que se aumenta la cantidad de efectos. Esto es directo, considerando que el calor específico disminuye en misma medida cuando se aumenta la cantidad de efectos, aumentando por ende el rendimiento total del sistema.

Lo anterior, por si solo, no permite generar un análisis completo, ya que se observa que el área en cada caso aumenta hasta $n = 7$. Aquí el valor se vuelve negativo, descartando de manera directa la opción de los 7 efectos y estableciendo un límite superior para el caso analizado. En este caso, la alta salinidad no permite establecer diferencias de temperatura lógicas entre los efectos, ya que el

BPE es demasiado alto y los flujos de los efectos anteriores no permiten entregar el calor suficiente para producir la evaporación. Así, el valor del área dimensionada es negativa debido a que no es el flujo de vapor por dentro de los tubos el que está entregando calor, sino que es el flujo de alimentación.

Otro punto importante a tener en cuenta es que, en todos los casos, los parámetros que dimensionan el *TVC* se mantienen constantes, independiente de la cantidad de efectos. Así, se hace necesario un análisis centrado en la variación de presión de cada caso para comprender cuál de todas estas entrega los mejores datos. Para lograr esto, se introducen las figuras 5.17, 5.18 y 5.19.

Se puede apreciar en ellas cómo se han jerarquizado los datos dependiendo de la presión motora. En las tres figuras se muestra que el caso más favorable, en términos de rendimiento, es el de presión motora $P_m = 1550[kPa]$, mostrando tanto los GOR más altos, mayor cantidad de salmuera producida y menor calor consumido (este último no se comprende bien, pero está sutilmente por debajo de la línea amarilla de los 2000 [kPa]).

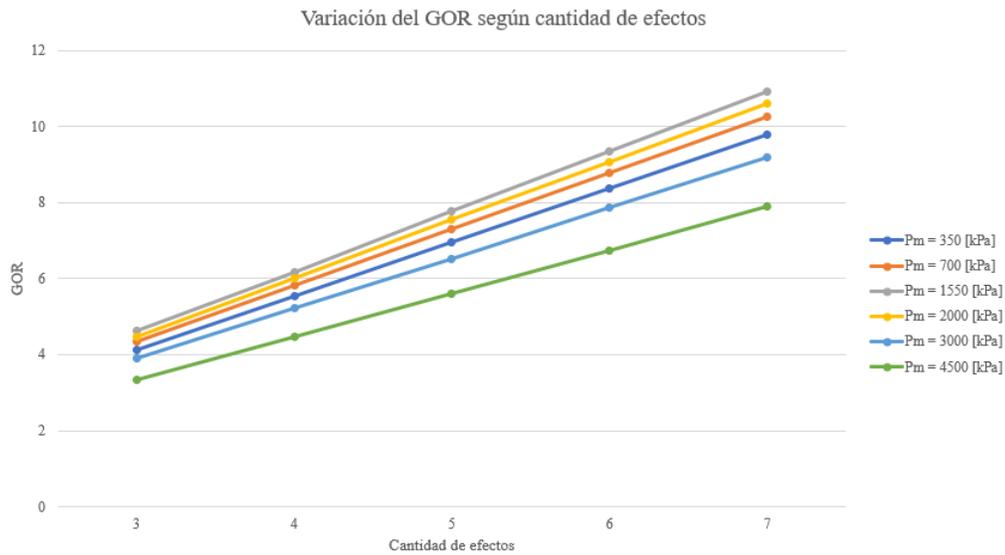


Figura 5.17: Comparación gráfica del GOR, dependiente de las presiones motoras [EP].

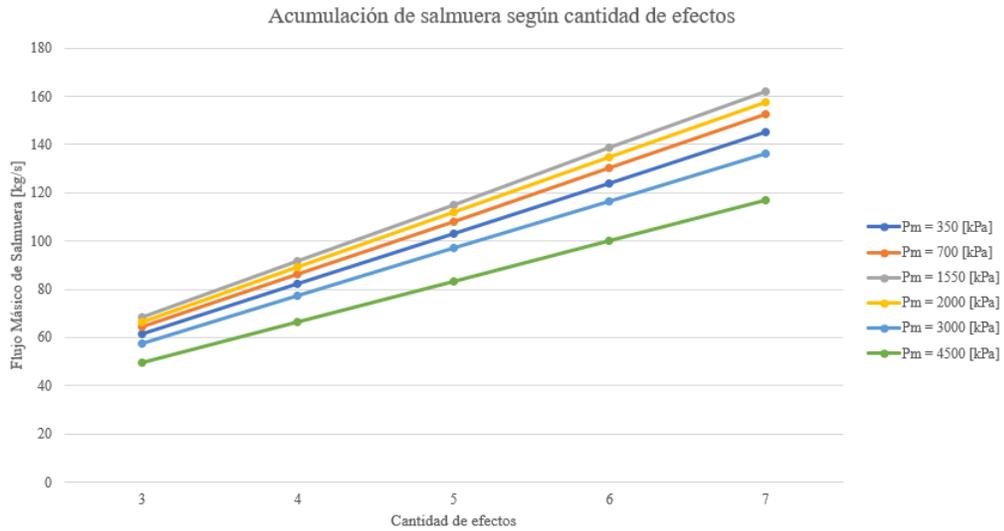


Figura 5.18: Comparación gráfica de la salmuera, dependiente de las presiones motoras [EP].

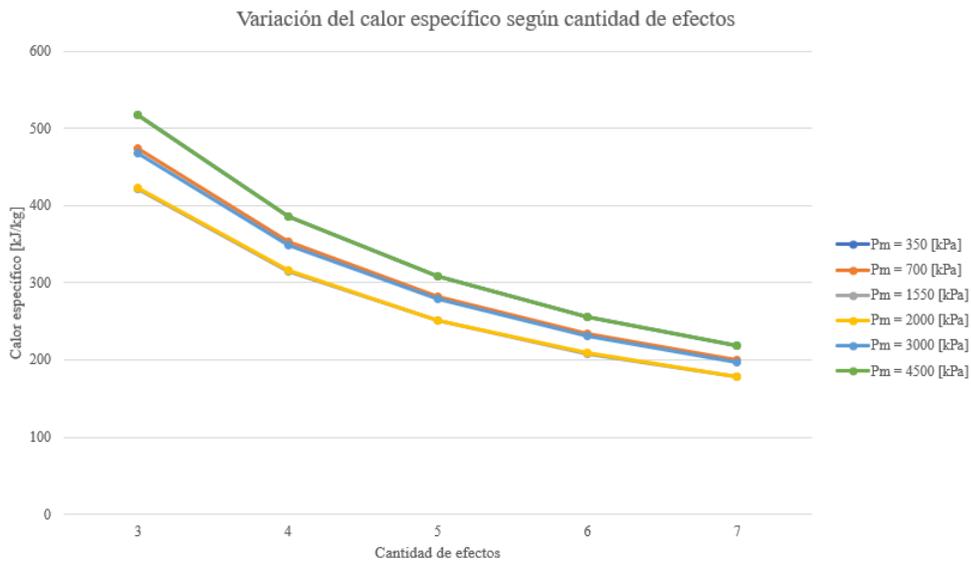


Figura 5.19: Comparación gráfica del calor específico, dependiente de las presiones motoras [EP].

Teniendo en cuenta los datos favorables de la presión anteriormente mencionada, se decide analizar las tablas iniciales nuevamente. A través de esto, se puede ver que el área específica aumenta de manera considerable cuando se tienen 6 efectos y, comparando con los datos de la tabla de validación expuesta en la sección anterior, se puede entender que esta es excesiva. Así, considerando que se debe intentar maximizar el rendimiento, se selecciona el caso de $n=5$, el cual mantiene una producción de salmuera razonable para el tamaño de la planta, sin sufrir una gran baja en rendimiento total.

Tabla 5.13: Tabla comparativa con $n = 5$ [EP].

| n | 5 | | | | | | | |
|---|-------------|------------------------------|------|--------|------|------------------------|-----------------------|------|
| | P_m [kPa] | $M_{b,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | CR | ER | Ra | A [$\frac{m^2}{kg}$] | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | GOR |
| | 350 | 103,02 | 4,16 | 72,1 | 2,34 | 903,85 | 308 | 6,95 |
| | 700 | 108,04 | 4,16 | 144,16 | 2 | 901,42 | 282,08 | 7,3 |
| | 1550 | 115,09 | 4,16 | 319,22 | 1,68 | 898,73 | 250,26 | 7,76 |
| | 2.000 | 111,79 | 4,16 | 411,89 | 1,82 | 900,02 | 251,74 | 7,54 |
| | 3000 | 96,89 | 4,16 | 617,84 | 2,93 | 906,93 | 278,15 | 6,53 |
| | 4.500 | 83,07 | 4,16 | 926,77 | 6,65 | 915,56 | 307,54 | 5,6 |

La tabla 5.13 muestra una comparación de cada presión motora con $n=5$ como cantidad de efectos. De aquí se vuelve a confirmar lo anteriormente mencionado: la presión motora cuyos datos favorecen de mejor manera el sistema es 1550 [kPa]. Es más, cada dato relativo al rendimiento alcanza su mejor número en esta presión. La razón de arrastre se encuentra en su mínimo, así como el calor específico y el área específica. El GOR está en su máximo y la cantidad de salmuera extraída es lógica para el tamaño de la planta diseñada.

Expresiones gráficas de estos datos se pueden ver en las figuras 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23. En ellas, se pueden ver los máximos y mínimos anteriormente mencionados. En primer lugar, la razón de arrastre permanece dentro de un rango lógico. Esto permite saber que la energía proveniente del termocompresor se está utilizando de manera eficiente, sin perder demasiado calor con el vapor atrapado del último efecto, pero al mismo tiempo reutilizando el calor latente que aún queda en el vapor producido allí. Sumado a esto, se puede ver cómo a medida que aumenta la presión a niveles mayores de 2000, el parámetro se dispara, provocando, por ende, que las presiones de los sistemas instalados en este tipo de salar deben permanecer relativamente bajas.

Los parámetros de rendimiento se ven favorecidos en esta presión debido a que se está utilizando una menor cantidad de vapor desde el último efecto para lograr el funcionamiento en ciclo. Esto significa que existe mayor cantidad de vapor disponible para los productos finales, aumentando la cantidad final de este y, por ende, el rendimiento. Asimismo, debido al uso más eficiente de los calores latentes de cada efecto, el calor específico necesario para el funcionamiento de la planta es menor, ahorrando por tanto en la fuente externa de calor.

Asociado a esto último, debido a que el flujo de calor entre efectos es más eficiente, el área específica de dimensionamiento de todo el sistema es mínima, logrando así un óptimo uso de los componentes necesarios para producir la salmuera. Ahora bien, se debe considerar eso si que la variación del área está sujeta de manera muy leve a la presión motora, lo cual es evidente comparando los valores de la tabla 5.13.

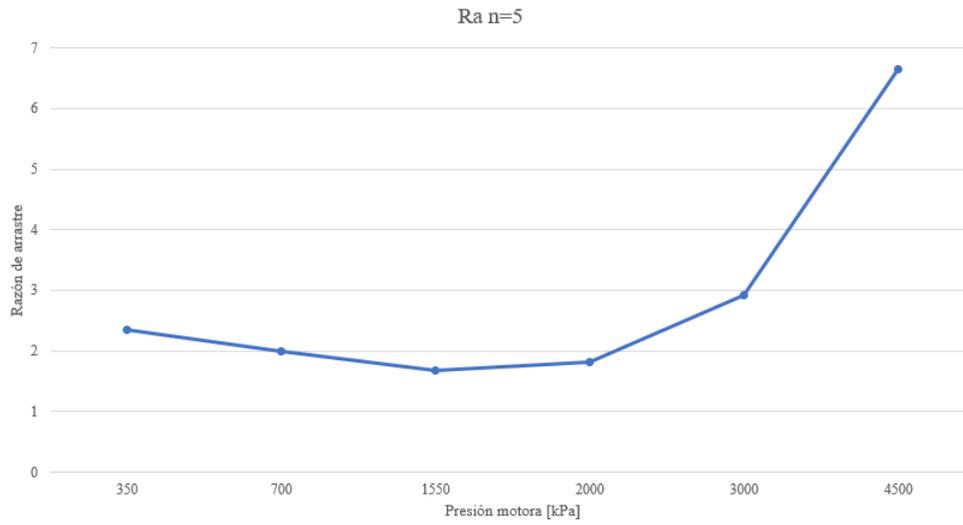


Figura 5.20: Razón de arrastre en función de la presión para n=5 [EP]

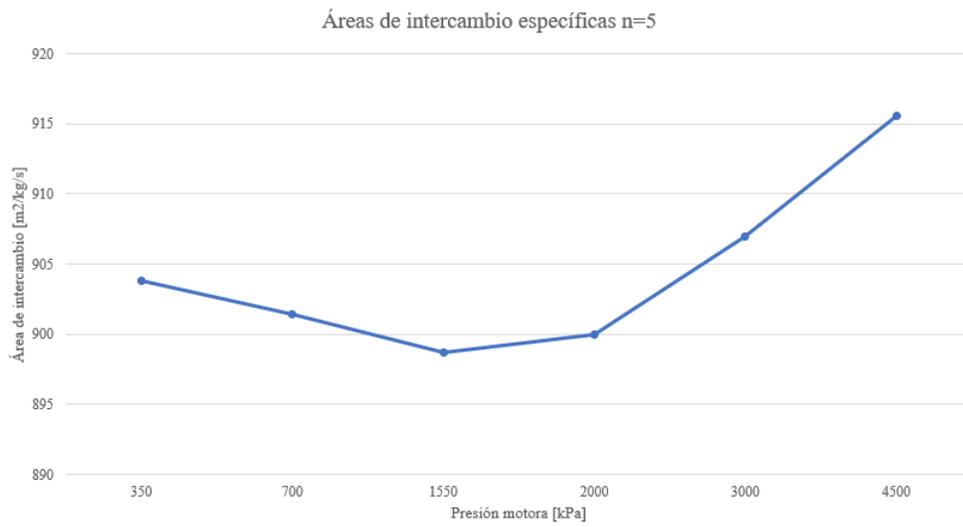


Figura 5.21: Área específica en función de la presión para n=5 [EP].

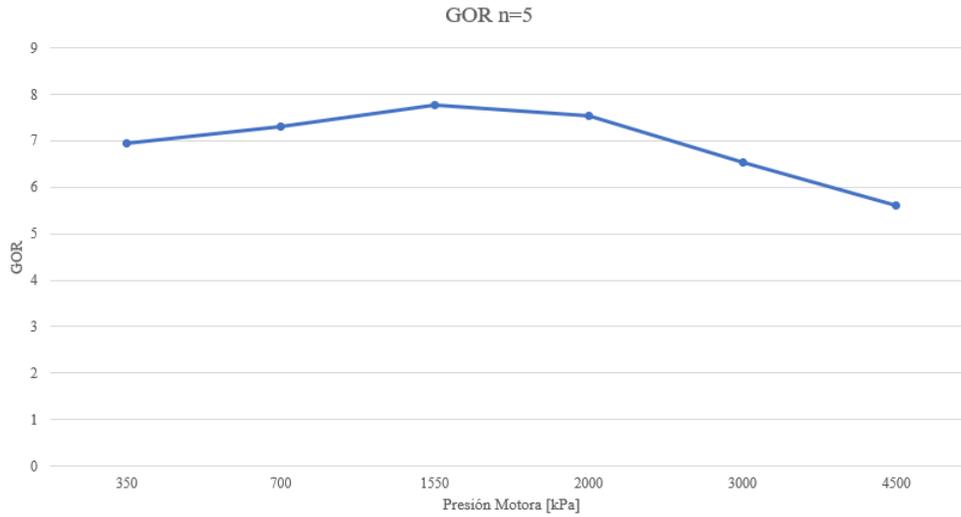


Figura 5.22: GOR en función de la presión para n=5 [EP].

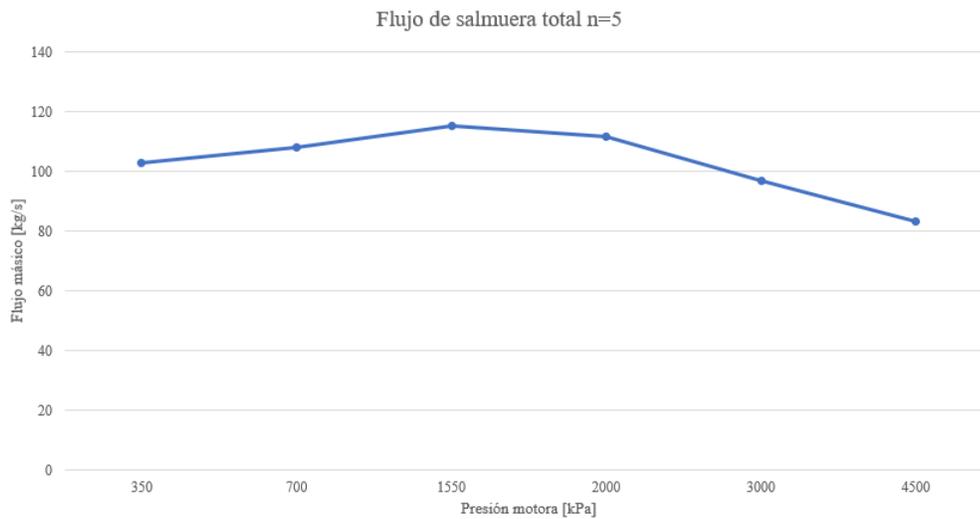


Figura 5.23: Salmuera en función de la presión para n=5 [EP].

Considerando esto, se establece como caso más favorable para la implementación al sistema con $n=5$ y $P_m=1550$ [kPa]. En la tabla 5.14 se presentan los datos de la planta dimensionada para el caso de estudio seleccionado; todo esto previo al dimensionamiento de las áreas fijas del sistema y del campo solar.

Tabla 5.14: Tabla de datos para el caso de estudio seleccionado [EP].

| Parámetro | Entrada | | | | | | | Rendimiento | | | TVC | | |
|-----------|---------|------------|----------------|---------------|-----------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------------------|------------------------------|------|--------|------|
| | n | T_s [°C] | $T_{b,n}$ [°C] | T_{cw} [°C] | $X_{b,f}$ [ppm] | P_m [kPa] | M_m [$\frac{kg}{s}$] | GOR | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | $M_{b,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | CR | ER | Ra |
| Valor | 5 | 60 | 35 | 20 | 240.000 | 1550 | 8,9 | 7,76 | 250,26 | 115,09 | 4,16 | 319,22 | 1,68 |

5.2.2. Dimensionamiento de Equipos

Se calcularon las dimensiones de los equipos por medio del método establecido en la sección 4.2.5. desde el cual se obtuvieron las áreas promedio para cada uno de los efectos (a excepción del primero) y cada precalentador. Se presentan las áreas obtenidas para cada equipo en la tabla 5.15.

Tabla 5.15: Tabla de áreas promedio para el caso de estudio seleccionado [EP].

| Área promedio | Valor [m^2] |
|-----------------|-----------------|
| Efecto 1 | 2.860 |
| Efecto i-ésimo | 13.800 |
| Precalentadores | 165,2 |
| Condensador | 3.070 |

Se manifiesta la diferencia de áreas entre los precalentadores y el resto de los equipos involucrados. Comparando las áreas de los equipos con otras plantas desalinizadoras similares, se ve que el área de los precalentadores efectivamente está dentro de lo esperable. Por otro lado, las áreas de los efectos es bastante alta, lo cual se explica de manera directa por la salinidad que se maneja en este caso en particular. La alta salinidad de la salmuera que pasa por fuera de los intercambiadores de calor significa un aumento de la temperatura de ebullición de los flujos entrantes, o sea, un aumento del área necesaria para evaporar dicho flujo. De hecho, el área específica que se aprecia en la tabla 5.16, corresponde a plantas comerciales cercanas a los 12 efectos o más. Esto es, indudablemente, uno de los precios que se debe pagar por equipar este tipo de plantas en ambientes de tan alta salinidad.

A partir de los datos de las áreas promedio, se recalcularon los flujos que sufrían cambios debido a este reajuste. Este cambio generó, inevitablemente, reajustes en los datos de rendimiento anteriormente descritos. Una tabla comprensiva, en la cual se establece una comparación entre el parámetro previo y posterior al reajuste, es presentada a continuación. En ella, se puede ver cómo el establecimiento de áreas promedio en los equipos genera cambios leves pero destacables.

Tabla 5.16: Variación de parámetros clave a partir del redimensionamiento de áreas [EP].

| Parámetro | Con Área Variable | Con Área Fija | Variación |
|------------------------------|-------------------|---------------|-----------|
| GOR | 7,76 | 7,6 | -2,06 % |
| Q [$\frac{kJ}{kg}$] | 250,26 | 255,49 | 2,09 % |
| A [$\frac{m^2}{kg/s}$] | 898,73 | 1.296,2 | 44,23 % |
| RR [%] | 62,5 | 63,24 | 1,18 % |
| $M_{b,f}$ [$\frac{kg}{s}$] | 115,09 | 116,46 | 1,19 % |
| $M_{c,f}$ [$\frac{kg}{s}$] | 69,05 | 67,64 | -2,04 % |
| X_b [ppm] | 240.000 | 237.000 | -1,25 % |

Debido a que la áreas involucradas en las principales transferencias de calor se han fijado como constantes, se han alejado del cálculo óptimo inicial. Esto genera, por consiguiente, una reducción general del rendimiento, lo cual puede verse de manera clara en la tabla presentada, con un GOR más bajo y un consumo de calor mayor. Es más, si bien existe un aumento de la producción de

salmuera, la salinidad final del nuevo flujo es levemente menor, haciendo entender que no se está logrando el punto óptimo de producción de salmuera; esto se refleja en la disminución de destilado, el cual ha diluido la salinidad del producto final.

Comprendiendo la afectación al rendimiento que significa fijar las áreas de los intercambiadores, se considera que no es lo suficientemente grande como para desestimar el reajuste. Los beneficios que implica fijar las áreas de transferencia de calor a la hora de fabricar dichos equipos, probablemente compensa la pequeña baja en rendimiento que trae dicho ajuste. Esto debido a que no se deberán fabricar intercambiadores de calor únicos para cada efecto, significando ahorros en mano de obra, materiales y logística. Sumado a esto, la estandarización de los equipos significa la estandarización de los sistemas de tuberías, algo que siempre será deseado por lo complejo que es este ítem.

5.2.3. Sensibilidad del rendimiento a la variación de la salinidad

Es necesario, para confirmar el punto óptimo de la factibilidad técnica de la planta, analizar el rendimiento de la misma con la variación de la salinidad final. Esto debido a que ella está ligada fuertemente a las temperaturas a las que debe trabajar la planta y, por ende, a su rendimiento final.

Es necesario considerar que, en el caso particular, se pretende aumentar al máximo la salinidad del flujo de salmuera, ya que esto permitirá extraer una mayor cantidad de litio. Por lo mismo, es crucial comprender cuál es el punto máximo de salinidad que puede soportar el modelo sin caer en resultados físicamente imposibles.

En la tabla 5.17 se presentan las variaciones de parámetros clave con respecto a la variación de la salinidad de entrada. Ahora, es necesario destacar que estos valores corresponden a los que arroja el modelo después del ajuste de áreas.

Tabla 5.17: Variación de parámetros de rendimiento con salinidad final introducida en el modelo [EP].

| Salinidad [ppm] | GOR | Q [$\frac{kJ}{kg}$] | A [$\frac{m^2}{kg/s}$] | $M_{b,f}$ [$\frac{kg}{s}$] | $M_{c,f}$ [$\frac{kg}{s}$] | RR | Salinidad corregida [ppm] |
|-----------------|------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|---------------------------|
| 200.000 | 7,65 | 253,91 | 889,96 | 118,48 | 68,06 | 63,51 % | 196.850 |
| 210.000 | 7,63 | 254,57 | 956,9 | 118,06 | 67,88 | 63,49 % | 206.760 |
| 220.000 | 7,61 | 255,13 | 1041 | 117,6 | 67,73 | 63,45 % | 216.740 |
| 230.000 | 7,59 | 255,51 | 1149,8 | 117,08 | 67,64 | 63,38 % | 226.840 |
| 240.000 | 7,59 | 255,49 | 1296,2 | 116,46 | 67,64 | 63,26 % | 237.180 |
| 250.000 | 7,63 | 254,66 | 1503,6 | 115,61 | 67,86 | 63,01 % | 248.030 |
| 260.000 | 7,71 | 251,75 | 1821,4 | 114,19 | 68,65 | 62,45 % | 260.260 |
| 270.000 | 8,01 | 242,3 | 2373,5 | 113,91 | 71,32 | 61,50 % | 277.390 |
| 280.000 | 9,85 | 197,04 | 3621,6 | 93,84 | 87,81 | 51,66 % | 338.720 |
| 290.000 | Imag | Imag | Imag | 153,73 | Imag | Imag | 213.380 |

En la tabla en cuestión, se logra identificar que el modelo puede predecir, adecuadamente, los parámetros de salinidad final por sobre el valor de 240.000 inicialmente supuesto. Es más, se puede identificar un aumento en el rendimiento de la planta a partir del siguiente input de salinidad, aumentando su GOR y disminuyendo el calor específico consumido. Esto se puede realizar hasta

un límite práctico aproximado de 280.000, desde el cual comienzan a haber resultados imaginarios que son físicamente imposibles de obtener.

Por esa razón, se planea cambiar el punto de diseño de la salinidad de ingreso al sistema. Para esto, se presentan las figuras 5.24, 5.25, 5.26 y 5.27, en las cuales se puede apreciar la variación de salinidad, GOR, área específica y flujo de salmuera con respecto a la variación de salinidad ingresada al modelo.

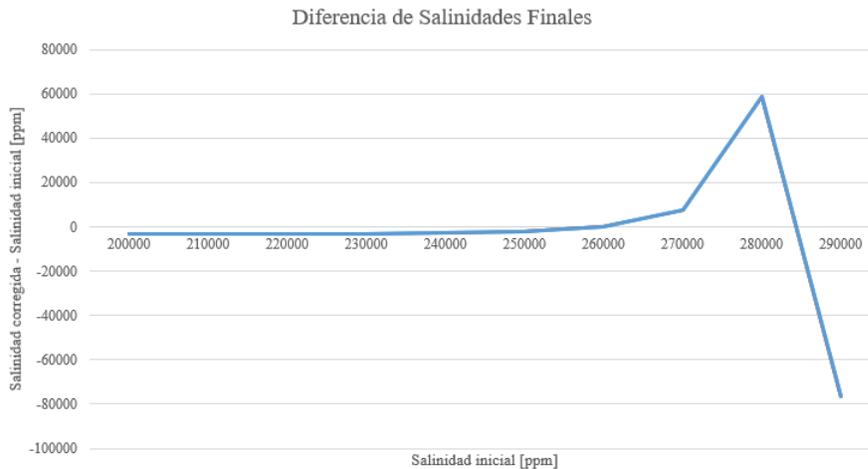


Figura 5.24: Variación de la diferencia entre la salmuera final ingresada al modelo y la ajustada por la variación de áreas [EP].

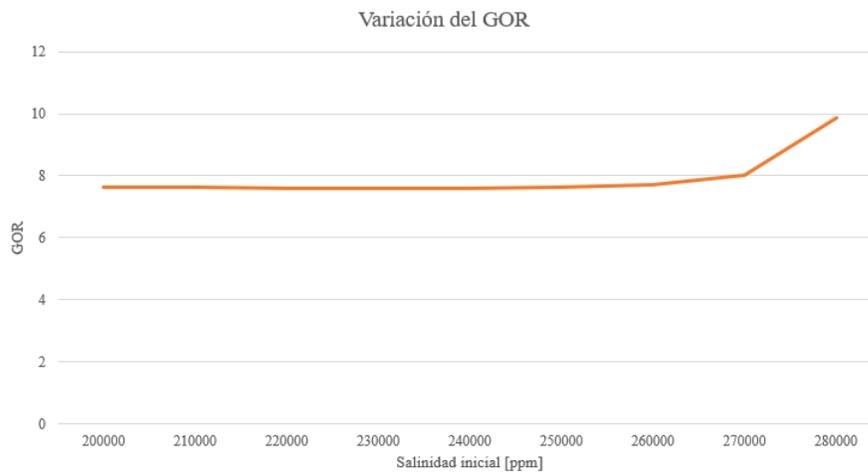


Figura 5.25: Variación del GOR con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP].

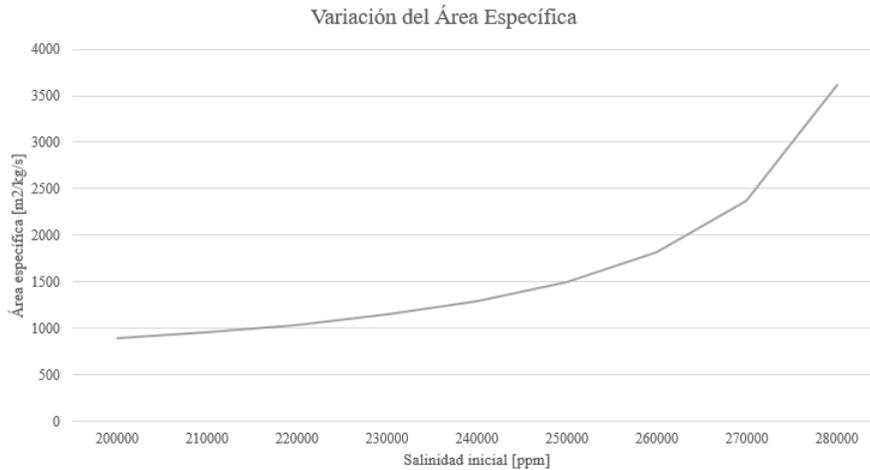


Figura 5.26: Variación del Área específica con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP].

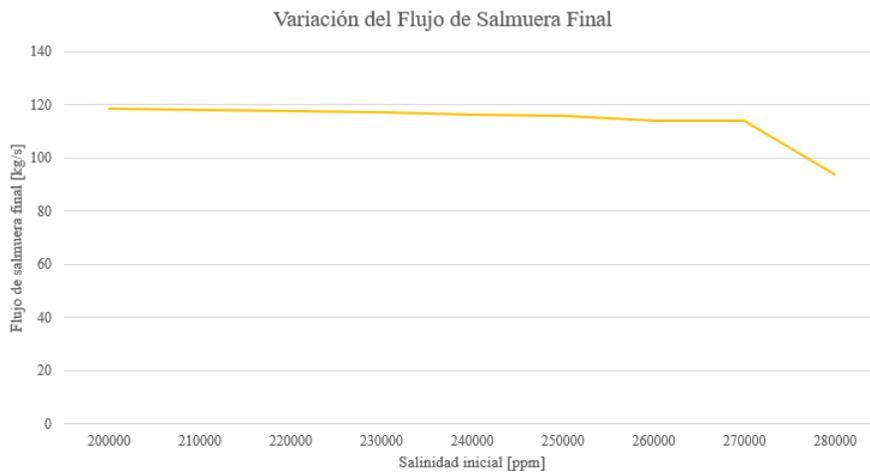


Figura 5.27: Variación del flujo de salmuera con respecto a la salinidad final ingresada al modelo [EP].

De la primera figura se puede extraer de manera inmediata cómo las variaciones en la salmuera ingresada y la ajustada son relativamente parecidas, aunque menores. Sin embargo, a partir de los 260.000 [ppm] se comienza a producir un aumento considerable, desde un punto levemente positivo (casi 0) hasta cerca de los 280.000, antes de caer debido a la pérdida de sentido físico. Estas diferencias tan grandes son un indicativo de que el modelo, con su ajuste correspondiente, no está prediciendo de buena manera lo que sucede a partir de tales salinidades.

Considerando esto último, se puede ver cómo el GOR, así como el flujo de salmuera, se mantienen más o menos constantes con el aumento de salinidad, hasta la llegada a los puntos previamente mencionados. Por tanto, de ello se puede extraer que la salinidad no afecta en mayor medida el rendimiento general de la planta. Por el contrario, el área de transferencia específica se ve afectada de manera exponencial con la salinidad. En la figura 5.26 puede apreciarse el comportamiento de tal aumento. En consideración de lo previamente señalado, para seleccionar la nueva salmuera a

ingresar, es necesario hacer un análisis basado en el costo asociado por metro cuadrado de intercambio térmico, para cada salinidad.

Considerando esto último, es que se introduce la tabla 5.18, en la cual se aprecia cómo, considerando las partes por millón de litio presente en el salar y la fracción total de esta con respecto a la cantidad de sales presentes en el salar de manera natural (251.000 [ppm]), se puede calcular la diferencia entre lo que se extraería (en [ppm]) sin el equipo (método actual) y con el equipo (método propuesto).

Habiendo dicho esto, todas las salinidades cuyas diferencias sean menores a cero son descartadas, puesto que no tendría sentido implementar un sistema que concentre estados salinos menores a los del sistema de extracción actual. Por lo mismo, se deben considerar valores a partir del 0 hacia arriba. Se desprende que, a partir de los 260.000 [ppm] aproximadamente, se comienzan a obtener diferencias mayores, por lo que el análisis se debe efectuar a partir de dicho punto .

Tabla 5.18: Valores de extracción por m^2 asociados a las salinidades anteriores (cada fila corresponde a cada salinidad; desde 200.000 a 280.000 [ppm]) [EP].

| PPM Litio en salar [55] | 3000 | Fracción Litio en Salar | 0,01195 | PPM litio extraído | Diferencia | Cantidad producida [ton/año] | \$USD/año | \$/año/m ² |
|-------------------------|------|-------------------------|---------|--------------------|------------|------------------------------|---------------|-----------------------|
| | | | | 2.352,3575 | -647,6425 | 8.789,31 | \$ 61.525.198 | \$ 1.016 |
| | | | | 2.470,782 | -529,218 | 9.199,07 | \$ 64.393.474 | \$ 991 |
| | | | | 2.590,043 | -409,957 | 9.605,52 | \$ 67.238.643 | \$ 954 |
| | | | | 2.710,738 | -289,262 | 10.008,68 | \$ 70.060.770 | \$ 901 |
| | | | | 2.834,301 | -165,699 | 10.409,49 | \$ 72.866.415 | \$ 831 |
| | | | | 2.963,9585 | -36,0415 | 10.806,23 | \$ 75.643.596 | \$ 741 |
| | | | | 3110,107 | 110,107 | 11.199,79 | \$ 78.398.554 | \$ 627 |
| | | | | 3314,8105 | 314,8105 | 11.907,68 | \$ 83.353.762 | \$ 492 |
| | | | | 4047,704 | 1047,704 | 11978,53 | \$ 83.849.677 | \$ 264 |

Considerando lo explicado anteriormente, se aprecian en la última columna los ingresos por metro cuadrado de intercambiador. Los ingresos producidos fueron calculados en vista de un precio de venta de 7000 [\$USD] por tonelada de litio y se dividieron estos por el área total de intercambio. Los valores resultantes disminuyen a medida que aumenta la salinidad final, lo que responde a una elevada necesidad de superficie intercambiadora, en razón de lo explicado en la sección anterior. Considerando esto, se plantea escoger aquella salinidad, de las tres posibles, que maximice los ingresos anuales por metro cuadrado; así, se selecciona la salinidad correspondiente a los 260.000 [ppm] para la planta final.

A continuación, se presentan dos figuras que permiten entender de manera gráfica las diferencias anteriormente descritas.

En ellas, se puede apreciar cómo el límite de salinidad producida es superado en el punto cercano a los 251.000 (validando, de paso, aún más el modelo creado). Además, se puede ver la tendencia en la disminución de ingreso por metro cuadrado de intercambio. Todo lo anterior es suponiendo que, si se hubiese seguido aumentando la salinidad, existiría un punto en que todo el sistema dejaría de ser rentable.

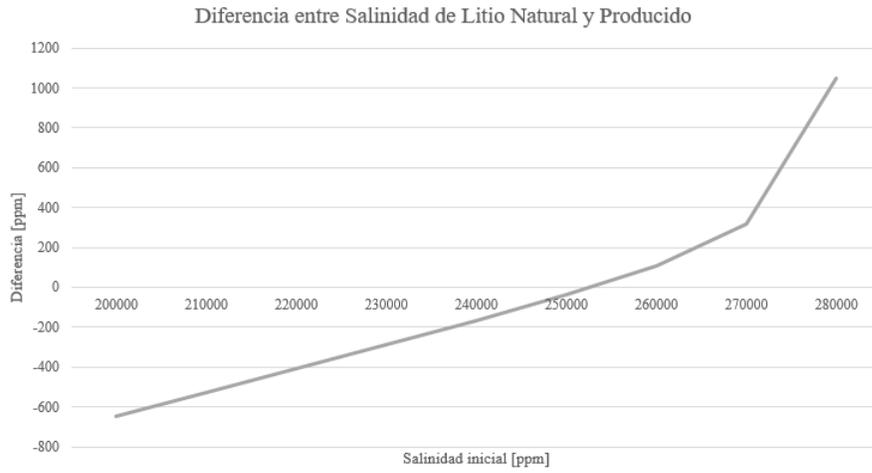


Figura 5.28: Diferencia entre el litio extraído por sistema tradicional y el extraído por el sistema propuesto en [ppm] [EP].

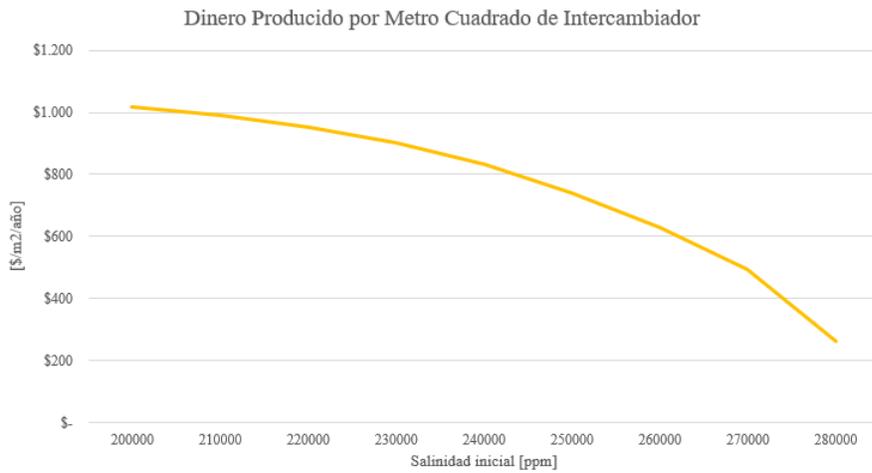


Figura 5.29: Variación del dinero obtenido por la producción vs el área de intercambio térmico [EP].

5.2.4. Planta final

Tabla 5.19: Datos completos de la planta de desalinización final [EP].

| <i>Planta desaladora TVC-MED diseñada</i> | | | | | |
|---|------------------|--------|--------|--------|--------|
| Parámetro | Número de efecto | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Temperatura de alimentación $T_{f,i}$ [°C] | 50,52 | 46,5 | 41,7 | 36,18 | 30 |
| Temperatura de efecto $T_{b,i}$ [°C] | 55 | 50 | 45 | 40 | 35 |
| Temperatura de vapor $T_{v,i}$ [°C] | 51,15 | 46,33 | 41,47 | 36,6 | 31,72 |
| Temperatura de condensado $T_{c,i}$ [°C] | 50,53 | 45,7 | 40,84 | 35,97 | 31,09 |
| Temperatura de vapor flashbox $T_{vfb,i}$ [°C] | - | 47,24 | 42,57 | 37,93 | 33,35 |
| Temperatura de vapor flasheado $T_{vfl,i}$ [°C] | - | 51,57 | 46,75 | 41,99 | 37,29 |
| Flujo másico de alimentación $M_{f,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | 36,58 | 36,58 | 36,58 | 36,58 | 36,58 |
| Flujo másico de salmuera $M_{b,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | 22,84 | 49,45 | 73,21 | 94,68 | 114,2 |
| Flujo másico de vapor $M_{v,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | 13,74 | 9,97 | 12,82 | 15,11 | 17,06 |
| Flujo másico de condensado $M_{c,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | 5,18 | 18,59 | 28,32 | 40,84 | 55,62 |
| Flujo másico de vapor flashbox $M_{vfb,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | - | 0,0594 | 0,0415 | 0,0494 | 0,0521 |
| Flujo másico de vapor flasheado $M_{vfl,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | - | 0,1015 | 0,219 | 0,2994 | 0,3451 |
| Flujo másico de precalentadores $M_{vpc,i}$ [$\frac{kg}{s}$] | 0,2159 | 0,2568 | 0,2935 | 0,3266 | - |
| BPE_i [°C] | 3,85 | 3,33 | 3,26 | 3,26 | 3,28 |
| Presión por efecto $P_{b,i}$ [kPa] | 15,99 | 12,54 | 9,75 | 7,5 | 5,72 |
| | | | | | |
| Parámetro | Valor Único | | | | |
| Flujo másico de salmuera total $M_{b,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | 114,2 | | | | |
| Flujo másico de condensado total $M_{c,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | 55,62 | | | | |
| Flujo másico de alimentación total $M_{f,t}$ [$\frac{kg}{s}$] | 182,9 | | | | |
| Flujo másico de agua condensador M_{cw} [$\frac{kg}{s}$] | 630,15 | | | | |
| Flujo másico vapor arrastrado M_{ev} [$\frac{kg}{s}$] | 5,18 | | | | |
| Flujo másico vapor motor M_m [$\frac{kg}{s}$] | 8,9 | | | | |
| Temperatura vapor caloportador T_s [°C] | 60 | | | | |
| Temperatura vapor arrastrado T_{ev} [°C] | 31,72 | | | | |
| Temperatura vapor motor T_m [°C] | 199,1 | | | | |
| Temperatura agua condensador T_{cw} [°C] | 20 | | | | |
| Razón de recuperación RR | 62,44 | | | | |
| Área promedio precalentadores [m^2] | 193,85 | | | | |
| Área promedio efectos [m^2] | 21.118 | | | | |
| Área efecto 1 [m^2] | 2.835,7 | | | | |
| Área condensador [m^2] | 3.405,4 | | | | |
| Presión vapor motor P_m [kPa] | 1.550 | | | | |
| Presión vapor arrastrado P_{ev} [kPa] | 4,76 | | | | |
| Presión vapor caloportador P_s [kPa] | 20,22 | | | | |
| Área de transferencia específica A [$\frac{m^2}{kg/s}$] | 1821,4 | | | | |
| Calor específico Q [$\frac{kJ}{kg}$] | 251,75 | | | | |
| GOR | 7,71 | | | | |
| Salinidad final $X_{b,f}$ [ppm] | 260.260 | | | | |
| Razón de arrastre Ra | 1,72 | | | | |
| Razón de expansión ER | 325,37 | | | | |
| Razón de compresión CR | 4,24 | | | | |

A partir de los datos que entrega la planta, se calculan los flujos finales resultantes; esto es, la cantidad de litio producido, la cantidad de agua reinyectada y las comparaciones correspondientes al proceso actual de extracción. En la tabla 5.20, se pueden ver los valores finales que produce la planta piloto.

Tabla 5.20: Productos finales producidos por la planta piloto [EP].

| Parámetro | Valor |
|---|----------|
| Agua destilada reinyectada [$\frac{kg}{s}$] | 55,62 |
| Agua destilada reinyectada [$\frac{lt}{s}$] | 55,62 |
| Agua destilada reinyectada [$\frac{m^3}{año}$] | 1754032 |
| Cantidad de litio producido [$\frac{ton}{año}$] | 11907,68 |

5.2.5. Continuidad de operación de la planta desalinizadora

En todo sistema que requiera de un recurso variable para su funcionamiento, es de vital importancia saber aproximadamente cuánta potencia se necesita para ponerlo en marcha. Esto se debe a que la variabilidad del recurso significará, inevitablemente, que en algún momento el estado estacionario se rompa, necesitando de una nueva puesta en marcha para la reactivación del sistema.

EN razón de lo anterior, se hace necesario calcular el coste energético que significan los estados transientes de operación, y si estos justifican la utilización de sistemas de respaldo y de almacenamiento para evitar el reinicio constante.

Para lograr esto, se utilizaron los supuestos explicados en la sección de Desarrollo, construyendo, por ende, una tabla sumatoria de la puesta en marcha de todos los sistemas involucrados en la transferencia de calor. Para lograr esto, se consideró la temperatura mínima promedio mensual de la zona de estudio, debido a que esa es la temperatura justo instantes antes de la salida del sol (el cual entrega la energía a la planta). Estas temperaturas se presentan en la tabla 5.21, acompañadas de las temperaturas promedio y máximas de cada mes.

Tabla 5.21: Temperaturas características de la zona del Salar de Atacama [EP].

| | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-----------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| T máxima [°C] | 27,53 | 27,34 | 26,77 | 24,88 | 21,73 | 20,39 | 19,75 | 21,95 | 21,95 | 25,12 | 26,36 | 27,27 |
| T promedio [°C] | 17,89 | 17,77 | 16,80 | 14,51 | 11,33 | 9,68 | 8,85 | 10,73 | 12,94 | 14,52 | 15,84 | 17,05 |
| T mínima [°C] | 7,91 | 8,31 | 6,89 | 4,65 | 1,98 | 0,32 | -0,66 | 0,28 | 1,57 | 3,02 | 4,45 | 6,31 |

Considerando estas temperaturas y los flujos máxicos de cada equipo, se calculan las potencias necesarias para llevar los equipos desde la temperatura ambiente a la temperatura de funcionamiento estacionario. La figura 5.30 muestra la potencia calculada a través del año. Se puede ver directamente cómo en los meses de invierno las potencias necesarias son mayores, debido a la mayor diferencia de temperatura entre el ambiente y el funcionamiento de los equipos. Aún así, es claro también que la diferencia no es extremadamente abultada debido a que en el altiplano andino las temperaturas mínimas no varían tanto a través del año.

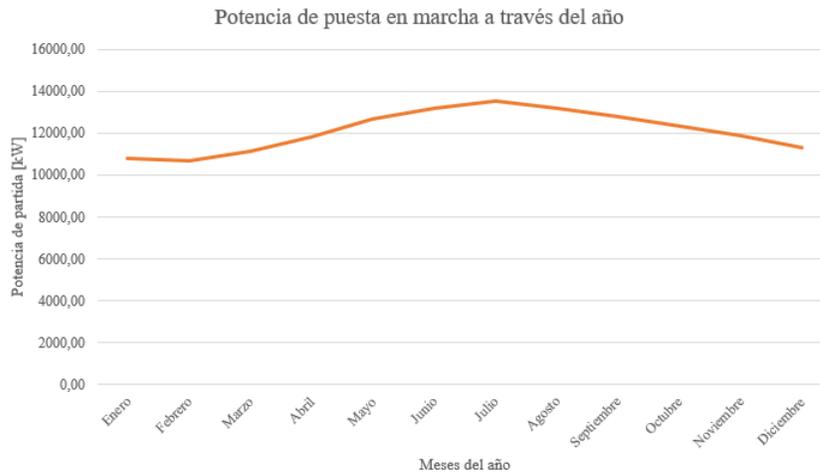


Figura 5.30: Potencia necesaria para la puesta en marcha a través del año [EP].

Para poder dimensionar de buena forma la diferencia entre la puesta en marcha y el estado estacionario de funcionamiento, se hace necesario tener un punto de referencia. Para esto, se toma el calor específico calculado para la planta, mostrado en la tabla 5.19 y se multiplica por el flujo másico del vapor motor. Se considera, por tanto, esta la potencia estacionaria de la planta. Luego, para generar una comparación válida, se divide la potencia de puesta en marcha por la potencia estacionaria. Los resultados se muestran en la tabla 5.22.

Tabla 5.22: Comparación de potencia estacionaria y de puesta en marcha [EP].

| | $Q_{start} [kW]$ | Q_{start}/Q_{in} |
|-------------------|------------------|--------------------|
| Enero | 10.801,07 | 4,82 |
| Febrero | 10.675,95 | 4,76 |
| Marzo | 11.121,18 | 4,96 |
| Abril | 11.827,80 | 5,28 |
| Mayo | 12.670,78 | 5,66 |
| Junio | 13.194,91 | 5,89 |
| Julio | 13.502,09 | 6,03 |
| Agosto | 13.205,58 | 5,89 |
| Septiembre | 12.800,28 | 5,71 |
| Octubre | 12.341,73 | 5,51 |
| Noviembre | 11.890,94 | 5,31 |
| Diciembre | 11.306,69 | 5,05 |

Analizando en detalle la tabla se puede ver cómo, en el caso más favorable, la relación es de 4,76, mientras que en el más desfavorable es de 6,03. En cualquier caso, las diferencias son bastante grandes por lo que no se justifica el reinicio del sistema cada día. Así, se hace necesario calcular un sistema de almacenamiento y de respaldo que permitan un funcionamiento durante las 24 [hrs] del día e, idealmente, los 365 días del año; entendiendo que solo deberá detenerse la producción para labores de mantenimiento e imprevistos.

5.3. Dimensionamiento de la Planta Solar

A continuación se presentan los resultados del procedimiento descrito anteriormente para calcular los parámetros claves en el dimensionamiento de la planta solar que entregará energía al sistema desalador.

5.3.1. Dimensionamiento preliminar

Se calculó, utilizando la ecuación 4.58, la potencia necesaria que necesita la planta desalinizadora para su funcionamiento. Para esto, se necesitaron las entalpías de entrada y salida de la planta desalinizadora, correspondientes a flujos de vapor saturado a 199,1 [°C] y 1550 [kPa], y agua subenfriada a 50,53 [°C] y 20,22 [kPa] respectivamente. Es directa la extracción de la entalpía de saturación del vapor a alta presión desde las tablas correspondientes. Por otro lado, para la entalpía del agua subenfriada se toma la aproximación $h(T, p) \approx h_f(T)$. Considerando el flujo másico del vapor motor, se presentan los resultados de dicho cálculo en la tabla 5.23.

Tabla 5.23: Tabla de resultados de potencia de funcionamiento para la planta desalinizadora [EP].

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-----------|
| M_m [$\frac{kg}{s}$] | 8,9 |
| h_{in} [$\frac{kJ}{kg}$] | 2.812 |
| h_{out} [$\frac{kJ}{kg}$] | 213,54 |
| \dot{Q} [kW] | 23.126,29 |

Luego, a partir de esta potencia, se puede calcular el área que utilizarían los colectores solares. Utilizando la ecuación 4.59 y asumiendo una eficiencia óptica del 65 %, se puede calcular para un punto de diseño pesimista. En este caso, amparándose en los datos extraídos del explorador solar, se diseña para una radiación de 0,62 [$\frac{kW}{m^2}$]. Los resultados son presentados en la tabla 5.24.

Tabla 5.24: Tabla de resultados del área colectora para la planta solar [EP].

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|-----------|
| \dot{Q} [kW] | 23.126,29 |
| η_{opt} | 0,65 |
| DNI [$\frac{kW}{m^2}$] | 0,62 |
| Área colectores [m^2] | 57.385,33 |

Almacenamiento

Habiendo obtenido la potencia necesaria para el funcionamiento de la planta desaladora, se procede a calcular la potencia de almacenamiento en el sistema. Para esto, se considera un múltiplo solar que pueda cubrir las 14 [hrs] previamente mencionadas. Basándose en los cálculos hechos por el Comité de Innovación Solar y Energético [56], se tiene que el múltiplo solar necesario para tal nivel de almacenamiento corresponde a 2,5.

En virtud de lo anterior, se procede al cálculo de la potencia total de la planta, así como de la potencia de carga del sistema de almacenamiento. Para la potencia de descarga es necesario escoger un concepto de almacenamiento para así obtener la eficiencia de descarga del mismo.

Utilizando la información cuantitativa y cualitativa recopilada para todos los sistemas de almacenamiento sensible ², se descartan, en primera medida, los sistemas de acumuladores de vapor y partículas descendentes por su baja capacidad de almacenamiento y la poca madurez del sistema, respectivamente. Se descartan también las sales derretidas debido a que no se alcanzan las temperaturas y presiones suficientes para su operación, lo cual podría generar el congelamiento irreversible de las sales en las tuberías, haciendo inútil al sistema. Por último, se descarta el concepto de cama empaquetada ya que el *HTF* debe ser gaseoso, cosa que no es el caso en el sistema modelado.

Los sistemas posibles que se pueden utilizar en el campo modelado son, por ende, los siguientes: tanques con aceite mineral o sintético, tanque único con agua, tanques con sodio líquido o el concepto de almacenamiento sólido con intercambiador de calor integrado. Se descarta el tanque con agua ya que el volumen de líquido necesario sería muy alto, lo que no se podría conseguir en abundancia ya que uno de los objetivos del trabajo es, justamente, disminuir la cantidad de agua que se extrae del salar.

En consideración de los sistemas restantes, se debe destacar que tanto los aceites como los tanques de sodio implicarían riesgos tóxicos en caso de que se produzcan fugas de ellos. Además, las temperaturas a las que trabajan podrían implicar incendios debido a lo volátiles que son en esos rangos. Por lo mismo, se deben diseñar sistemas de tanques y tuberías que eviten fugas a toda costa, lo que significaría costos de inversión muy altos. Sumado a esto, la cantidad de fluido que se necesitaría para llenar los tanques y tuberías significaría un costo de inversión aún mayor.

A partir el análisis previo, se escoge como concepto de almacenamiento el sistema de almacenamiento sólido con concreto como material. Esto debido a los bajos costos que significa su implementación, buena capacidad de almacenamiento por volumen, bajo riesgo medioambiental y alta estabilidad cíclica a largo plazo [57]. Así, considerando que se debe escoger un fluido caloportador que pase por dentro del intercambiador de calor integrado, se escoge el aceite sintético Therminol-62 por sus buenas características térmicas para la aplicación y su disponibilidad en el mercado. Además, al estar sólo presente en las tuberías y no en tanques de acumulación, la reducción de inversión disminuye bastante.

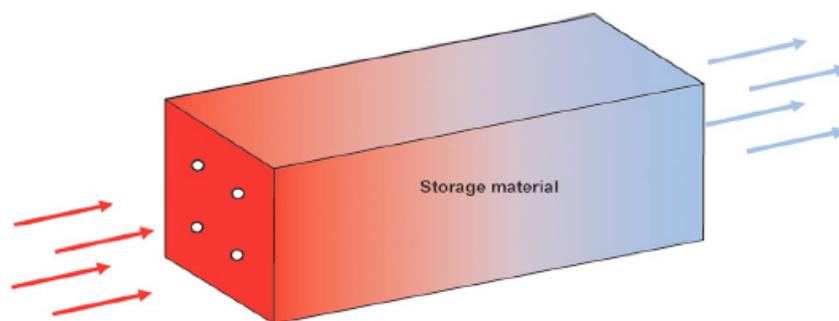


Figura 5.31: Funcionamiento de módulo de almacenamiento de concreto [57]

² Disponibles en el anexo F.

Luego, la eficiencia de este tipo de almacenamiento es cercana a 95 % para plantas de gran envergadura. Por lo mismo, se puede calcular la potencia de descarga aproximada del sistema. Con esto, se presenta la tabla 5.25 en la que se muestran los resultados de los cálculos de potencia total, potencia de carga, potencia de descarga y área total del campo solar.

Tabla 5.25: Tabla de resultados para almacenamiento [EP].

| Parámetro | Valor |
|------------------------------------|------------|
| \dot{Q}_{tot} [kW] | 57.815,72 |
| $A_{colectores}$ [m ²] | 143.463,34 |
| \dot{Q}_{carga} [kW] | 34.689,43 |
| $\eta_{descarga}$ | 0,95 |
| $\dot{Q}_{descarga}$ [kW] | 32.954,96 |

Intercambiador de calor

Para calcular el intercambiador de calor es necesario calcular dos magnitudes claves, el flujo másico de *HTF* y la variación de temperatura. Para lograr eso se calcula, en principio, el flujo másico de vapor que entregará el calor al aceite térmico. Esto se hace con el flujo calórico de carga y las entalpías previamente calculadas. Luego, para calcular las entalpías del fluido caloportador se toma la aproximación $h(T, p) \approx h_f(T) + v_f(T)[p - p_{sat}(T)]$, asumiendo una diferencia de temperatura de 100 [°K] y una presión de 25 [bar].

A partir del flujo másico calculado se utiliza la ecuación 4.65 para calcular la diferencia de temperatura real. Se presenta por tanto la tabla 5.26 en la que se ven los valores calculados.

Tabla 5.26: Tabla de resultados del intercambiador de calor [EP].

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------------|--------|
| $M_{m,HEX}$ [$\frac{kJ}{kg}$] | 13,35 |
| h_{in} [$\frac{kJ}{kg}$] | 2.812 |
| h_{out} [$\frac{kJ}{kg}$] | 213,54 |
| $h_{in,HTF}$ [$\frac{kJ}{kg}$] | 796,3 |
| $h_{out,HTF}$ [$\frac{kJ}{kg}$] | 548,2 |
| M_{HTF} [$\frac{kg}{s}$] | 139,8 |
| $C_{p,HTF}$ [$\frac{kJ}{kgK}$] | 2,57 |
| ΔT_{HTF} [°C] | 96,55 |

Caldera auxiliar

En concordancia con el objeto de reducir el impacto ambiental de la planta, se utiliza gas natural como combustible fósil, el cual posee las menores emisiones de CO_2 por *kg* utilizado, además del mayor valor calorífico. Considerando esto, se calculó el flujo másico de gas a utilizar y se presentan

los valores en la tabla 5.27.

Tabla 5.27: Tabla de resultados para la caldera auxiliar [EP].

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-----------|
| \dot{Q}_{comb} [kW] | 57.815,72 |
| η_{comb} | 0,9 |
| H_v [$\frac{kJ}{kg}$] | 48.000 |
| M_{comb} [$\frac{kg}{s}$] | 1,34 |

Elección de colectores y receptor

Para seleccionar qué tipo de tecnología utilizar, se hizo una comparación a través de la bibliografía pertinente de los sistemas aplicables para el caso de la planta desalinizadora en particular. Considerando las temperaturas y presiones a las que se trabaja, solo se pueden tomar en cuenta, de manera realista, a las tecnologías parabólicas y lineales Fresnel.

Comparando ambas, se aprecia que, en general, la tecnología de mayor madurez comercial es la de cilindro parabólico, teniendo muchos más años en el mercado. Aún así, la bibliografía indica que en los últimos años se ha visto un aumento de la aplicación de sistemas *LFR*, en especial para la generación directa de vapor [58] [59].

La mayoría de las aplicaciones de plantas solares de concentración son utilizadas en la producción de energía eléctrica. En este aspecto, la opción más rentable y segura suele ser la de cilindros parabólicos, esto, debido a su mayor eficiencia óptica general y mayor eficiencia térmica (aunque los avances en colectores Fresnel están equiparando a ambas tecnologías). En aplicaciones térmicas industriales, por otro lado, la opción de *LFR* se torna bastante atractiva, debido a sus bajos costos de inversión, simplicidad de construcción y operación, y menor terreno de utilización total.

Considerando las temperaturas y presiones a las que debe trabajar el sistema desalador modelado, se escoge la tecnología Fresnel Lineal como la más adecuada para la aplicación. Esto debido a que sus costos, para tecnologías de este tipo, suelen ser bastante competitivos e incluso favorables. En las tablas del anexo asociado a esta decisión, se puede ver como los costes de inversión para este tipo de colectores son del orden de 55 % el coste de los *PTC* [60] [61] [62].

Habiendo escogido la tecnología a utilizar, se procede a seleccionar un tipo de colector comercial para su utilización. En virtud de lo anterior, es relevante considerar que uno de los proveedores de este tipo de colectores es la empresa Novatec y que el software SAM entrega los datos de uno de los colectores de la compañía por defecto; así, se procederá a utilizar este para el cálculo final de la planta. En la tabla 5.28 se pueden ver los datos básicos que caracterizan a este colector.

Tabla 5.28: Datos del colector solar LFR por defecto en SAM [EP].

| Parámetro | Valor |
|--|--------------|
| Área de apertura reflectiva [m^2] | 513,6 |
| Largo del módulo colector [m] | 44,8 |
| Diametro interno/externo de la envoltura de vidrio [m] | 0,115/0,12 |
| Diametro interno/externo del tubo colector [m] | 0,065/0,07 |
| Reflectividad de los espejos [%] | 93,5 |
| Absorsividad del tubo colector [%] | 96,3 |
| Emisividad del tubo colector [%] | 13,84 |
| Área de apertura reflectiva de un loop [m^2] | 8217,6 |

5.3.2. Planta modelada en SAM

Se introducen los valores obtenidos en los cálculos preliminares dentro del software. De aquí se obtienen los siguientes valores (correspondientes a la planta solar final):

Tabla 5.29: Parámetros finales de la planta solar modelada [EP].

| Parámetro | Valor |
|---|-------------|
| $A_{colectores} [m^2]$ | 139.699,2 |
| Área del campo solar [m^2] | 390.000 |
| Producción total anual de energía térmica [kWh] | 122.346.688 |
| Factor de capacidad [%] | 60.4 |
| DNI de diseño [$\frac{kW}{m^2}$] | 0,62 |
| $\dot{Q} [kW]$ | 23.157,98 |
| $\dot{Q}_{tot} [kW]$ | 59.516 |
| $\dot{Q}_{carga} [kW]$ | 36.358,02 |
| $\dot{Q}_{descarga} [kW]$ | 34.540,12 |
| $M_m [\frac{kg}{s}]$ | 8,9 |
| $T_{c,1} [^{\circ}C]$ | 50 |
| $T_m [^{\circ}C]$ | 203,3 |
| $h_{in} [\frac{kJ}{kg}]$ | 2.802,7 |
| $h_{out} [\frac{kJ}{kg}]$ | 213,54 |
| $M_{m,HEX} [\frac{kg}{s}]$ | 13,35 |
| $M_{HTF} [\frac{kg}{s}]$ | 139,4 |
| $\Delta T_{HTF} [^{\circ}C]$ | 101,56 |

Teniendo presentes los datos anteriores, se puede calcular la energía de almacenamiento y de calor auxiliar durante un año característico y, con eso, obtener las dimensiones del almacenamiento y la cantidad de combustible que se utiliza en un año. En la siguientes tablas se presentan los resultados del dimensionamiento final del almacenamiento sólido y la caldera auxiliar impulsada por gas natural, respectivamente.

Para la tabla 5.30, se consideraron las 14 horas de almacenamiento previamente asumidas. Además, se utilizó la tabla de características de almacenamiento en el anexo para calcular el volumen de almacenamiento de concreto necesario. Considerado esto, debido a que es imposible diseñar una pieza de concreto de tal volumen, se subdividió el mismo en módulos de 4x2,6x18 [57] para modelarlo por completo. Siguiendo estas dimensiones, se requieren 64 módulos, los cuales se pueden ordenar en una gran matriz de 8x8 módulos. Considerando una separación entre ellos se llega a la superficie estimada que utilizará el almacenamiento, siendo esta 6612 [m^2]. Por último, se calcula el volumen de aceite sintético que se debe utilizar.

Tabla 5.30: Parámetros finales del almacenamiento modelado [EP].

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------------|-----------|
| \dot{Q}_{carga} [kW] | 36.358,02 |
| Horas almacenamiento [hrs] | 14 |
| Energía de almacenamiento [kWh] | 509.012 |
| Volumen de almacenamiento [m^3] | 11.568 |
| Dimensiones de módulo [m] | 4x2,6x18 |
| Volumen de modulo [m^3] | 187,2 |
| Número de módulos | 64 |
| Área total de uso [m^2] | 6.612 |
| Volumen de Therminol-62 [m^3] | 10.180,25 |

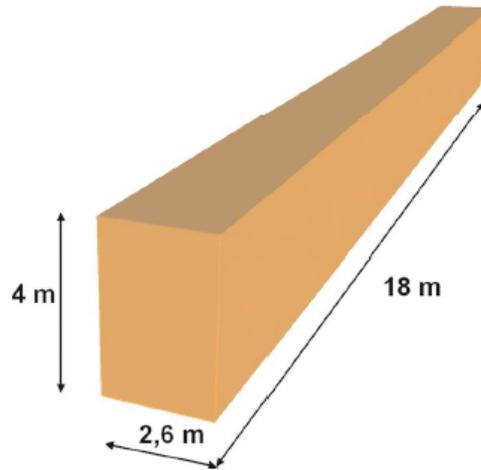


Figura 5.32: Dimensiones del módulo de almacenamiento [57].

Tabla 5.31: Parámetros finales de la caldera auxiliar modelada [EP].

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-------------------------|
| Q_{tot} [kW] | 59.516 |
| Mcomb [$\frac{kg}{s}$] | 1,38 |
| Energía de combustible [kWh] | 80.214.053,72 |
| Energía de combustible [kJ] | $2,8877 \times 10^{11}$ |
| H_v [$\frac{kJ}{kg}$] | 48000 |
| Masa de combustible [kg] | 6.016.054,02 |
| Densidad [$\frac{kg}{m^3}$] | 0,737 |
| Volumen combustible [m^3] | 8.162.895,56 |

Para el cálculo de la caldera auxiliar, se utiliza la energía producida por la planta y el factor de capacidad. Con este, se puede saber toda aquella energía que no cubre el campo solar en un

año. Por lo mismo, se puede calcular con ella la energía necesaria que debe aportar el combustible para el funcionamiento de la planta. Con la energía y el valor calórico del gas natural, es posible obtener la masa de combustible necesaria, y con su densidad, el volumen final de combustible por año.

Ambos cálculos coinciden con lo que se esperaría para una planta solar de tales características [63], por lo mismo, se espera que al momento de realizar las evaluaciones económicas correspondientes, las estimaciones estén dentro de los rangos de inversión esperables para este tipo de planta solar.

Concernientes al almacenamiento, se espera un ahorro sustancial en esta materia. Sumado a la elección de colectores tipo Fresnel, el dinero de una eventual inversión debería ser recuperado rápidamente, más aún considerando que el producto vendido tiene un precio de mercado importante.

5.4. Evaluación Económica

5.4.1. Costos de inversión

Para estimar los costos de inversión del proyecto completo, conviene separar la estimación en cuatro subsistemas:

- Sistema desalador: Cálculo de todos los equipos que forman la planta, incluyendo las bombas que hacen circular los fluidos.
- Sistema solar: Costo de colectores, bomba presurizadora, área de implementación, entre otros.
- Almacenamiento térmico: Costo de módulos de almacenamiento, fluido caloportador e intercambiador de calor.
- Otros: Ingeniería, caldera auxiliar, construcción, instalaciones, entre otros temas.

Esta separación pretende conseguir un análisis más exacto de todo el proyecto, debido a que cada uno de ellos presenta propiedades únicas que influyen en sus costos, lo que podría generar confusiones al realizar la evaluación de manera conjunta.

La tabla 5.32 muestra la estimación de costos de capital realizada componente a componente en cada sistema. Para realizar las estimaciones se usaron las siguientes referencias [64] [65] [66].

De ella, se aprecia que aquello que más encarece el proyecto es el sistema desalador. Es más, los intercambiadores de calor de los efectos son, por un gran margen, lo más costoso. Dada la elevada salinidad de la salmuera, las áreas de transferencia de cada efecto deben ser de gran tamaño para que sean efectivas; esto, naturalmente, acarrea costos más elevados.

Otra cuestión de relevancia es el costo de almacenamiento. Usualmente, en los sistemas solares el almacenamiento puede llegar a costar el 50% de todo el proyecto. Esto tiene por causa el alto costo de los fluidos de transferencia utilizados y los enormes tanques en los que deben guardarse. Debido a que se utiliza concreto como medio de acumulación de calor, los costos de almacenamiento disminuyen bastante. Es más, dentro de este ítem, el mayor costo se atribuye al aceite sintético,

por lo que encontrar la forma de eliminarle como intermediario podría generar un gran abaratamiento de costos.

Se le agrega a la inversión en equipos los costos directo e indirectos asociados a ellos. En el primer ítem se incluyen los costos relacionados a la instalación de los equipos, la instrumentación necesaria para el control de la planta, los componentes mecánicos y eléctricos de la misma, además de otros puntos. Mientras, en los costos indirectos se incluye todo aquello necesario para construir el sistema y dejarlo operando.

Para la distribución de los costos de estas últimas secciones se utilizó la misma distribución mostrada en [66], la cual se basa en los pesos relativos a los costos de inversión. Ahora bien, es necesario tener presente que este tipo de aproximaciones suelen tener márgenes de error entre $\pm 30\%$, lo cual es aceptable para esta etapa de análisis.

Se introduce la figura 5.33, en la cual se puede ver la distribución de costos de todo el proyecto. La mayor parte de la inversión está asociada a los anexos del proyecto, donde sus distribuciones se mueven conforme a los pesos seleccionados para cada uno. Dentro de los costos de inversión de equipos, se puede ver cómo la planta desaladora es la más costosa de los tres subsistemas.

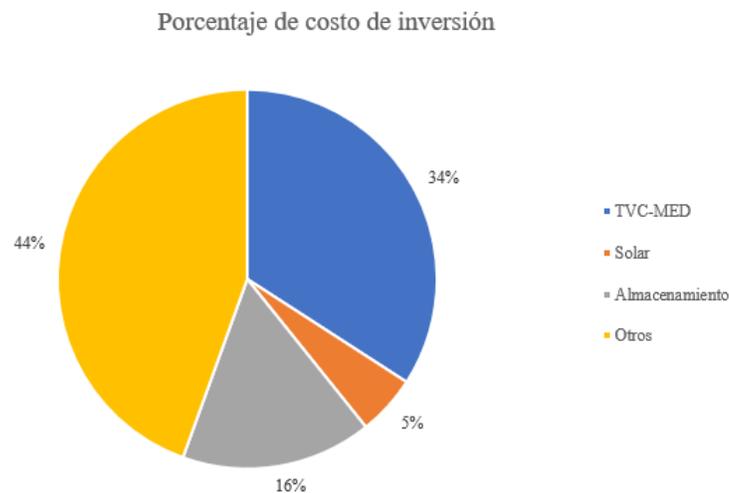


Figura 5.33: Distribución de costos del proyecto [EP].

Tabla 5.32: Cálculo de costos de capital [EP].

| | Componente | Costo unitario [\$/un] | Cantidad | Costo total [\$/US] |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|
| TVC-MED | Precalentador | \$27.709 | 4 | \$110.836 |
| | Efecto 1 | \$2.416.272 | 1 | \$2.416.272 |
| | Efecto i | \$17.994.437 | 4 | \$71.977.746 |
| | Condensador | \$2.901.366 | 1 | \$2.901.366 |
| | Bomba salmuera | \$7.283 | 1 | \$7.283 |
| | Bomba destilado | \$7.270 | 1 | \$7.270 |
| | Bomba alimentación | \$7.449 | 1 | \$7.449 |
| | Termocompresor | \$3.836 | 1 | \$3.836 |
| | | | Total | \$77.432.058 |
| Solar | Colectores | \$11.588.438 | 1 | \$11.588.438 |
| | Bomba presurizadora | \$7.258 | 1 | \$7.258 |
| | | | Total | \$11.595.696 |
| Almacenamiento | Concreto | \$2.799.566 | 1 | \$2.799.566 |
| | Therminol-62 | \$34.103.822 | 1 | \$34.103.822 |
| | HEX | \$5.228 | 1 | \$5.228 |
| | | | Total | \$36.908.616 |
| Caldera auxiliar | Caldera | \$2.723.074 | 1 | \$2.723.074 |
| | | | Total componentes | \$128.659.444 |
| | | | <i>Peso</i> | |
| Costos directos | Instalación | | 0,1 | \$12.865.944 |
| | Instrumentación | | 0,04 | \$5.146.378 |
| | Mecánica | | 0,08 | \$10.292.756 |
| | Electrica | | 0,04 | \$5.146.378 |
| | Edificios (servicios incluidos) | | 0,07 | \$9.006.161 |
| | Instalación de los servicios | | 0,11 | \$14.152.539 |
| | Terreno | | 0,02 | \$2.573.189 |
| | | | <i>Peso</i> | |
| Costos indirectos | Ingeniería y supervisión | | 0,1 | \$12.865.944 |
| | Gastos de construcción | | 0,08 | \$10.292.756 |
| | Contratista | | 0,06 | \$7.719.567 |
| | Contingencia | | 0,06 | \$7.719.567 |
| | | | Total final | \$226.440.622 |

Para comparar los costos de inversión calculados con los de otros proyectos, se debe hacer una comparación separada de la planta solar y la planta desalinizadora. En cuanto a la primera, se tiene que, para proyectos tipo Fresnel, los costos de inversión son acordes a lo que se esperaría para una planta de este tipo. Es más, los costos calculados para almacenamientos de esta envergadura son menores, dando pie a la idea de la instalación de conceptos de almacenamiento más eficientes; en especial para el trabajo a temperaturas del rango de la planta.

Por otro lado, la planta desaladora se mantiene en un rango muy superior al esperado para plantas con ese nivel de producción de destilado. Esto se debe, como se dijo anteriormente, a la gran salinidad con la que se debe trabajar. No obstante, los costos de los efectos, en contraste al resto, de los componentes de la planta, se mantiene dentro de lo esperado. En la figura 5.34 se presenta una distribución de los costos de equipos dentro de la planta en la cual se puede ver como cerca del 77 % de los costos es generado por los efectos. En la referencia [67], la cual compara costos de

plantas *TVC-MED*, se pueden ver distribuciones de costos de equipos bastante parecidas. Esto último indica que la salinidad es un parámetro principal a considerar cuando se analizan estas plantas, ya que son un catalizador para el aumento de los costos.

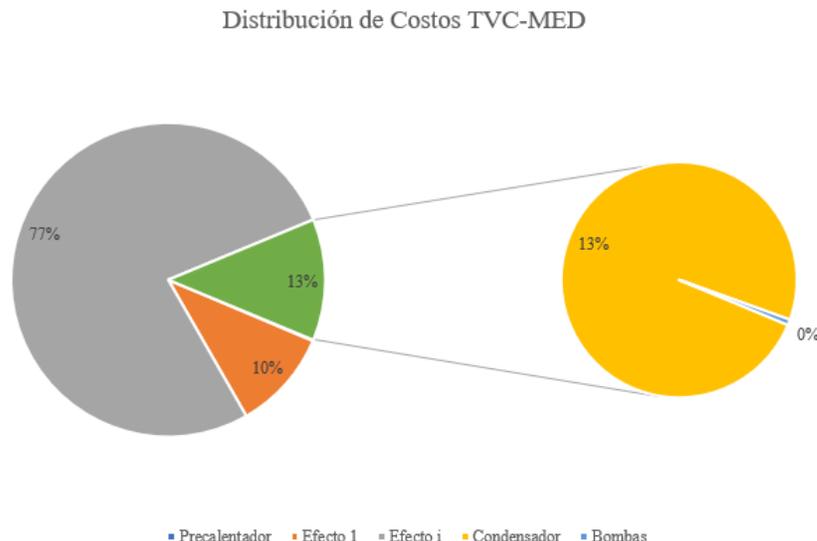


Figura 5.34: Distribución de costos dentro de la planta desalinizadora [EP].

5.4.2. Costos de operación y mantenimiento

Los costos de esta sección se distinguen en dos subgrupos, los costos fijos y los variables. Dentro de los costos fijos se incluyen los costos de mantenimiento en general y los costos de mano de obra. Para los costos variables se considera el costo del gas natural a utilizar y la energía eléctrica que consume la planta. Para estos últimos, los costos que se muestran en esta sección corresponden a los del año 0, o el año de la inversión.

En primer lugar, se presenta la tabla 5.33 en la que se pueden ver los costos asociados a los gastos de energía eléctrica para cada bomba asociada a los flujos que manejan. Para hacer esta estimación se consideraron los costos de energía en Chile, correspondientes a 123,2 [$\$/MWh$] [68], y se utilizaron las bombas del catálogo de la empresa *Purity* [69]. A partir de ellos se tienen los primeros costos variables del análisis.

Tabla 5.33: Costos asociados a las bombas del proyecto [EP].

| Flujo | Potencia [kW] | Energía [kWh] | Precio [$\$/kWh$] | Costo diario [$\$$] | Costo anual [$\$$] |
|--------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| $M_{b,t}$ | 30 | 720 | \$ 0,12 | \$ 89 | \$ 32.324 |
| $M_{c,t}$ | 11 | 264 | \$ 0,12 | \$ 32 | \$ 11.852 |
| $M_{f,t}$ | 250 | 6000 | \$ 0,12 | \$ 738 | \$ 269.370 |
| M_m | 5,5 | 132 | \$ 0,12 | \$ 16 | \$ 5.926 |
| M_{HTF} | 90 | 2160 | \$ 0,12 | \$ 266 | \$ 96.973 |
| Total | | | | | \$ 416.446 |

Para el cálculo de los costos de combustible, se consideró un precio de 0.037 [$\$/kWh$] [70],

correspondiente al precio medio del gas natural en Chile. Con esto, y sabiendo la energía que debe suplir el combustible, se calcula un costo anual de \$ 2.967.920 [US\$]. Sumado a esto, y para pasar al ítem de costos fijos, se calculan los costos de mantenimiento considerando estos como un 2% de los costos de inversión de equipos. Así, el valor de mantenimiento anual asciende a \$ 1.548.641 [US\$] por año.

Para calcular el último ítem de los costos de operación y mantenimiento, se consideran puestos de trabajo típicos para este tipo de plantas. Estos corresponden a un jefe general, jefes de planta y mantenimiento, técnicos, operarios y personal auxiliar. En la tabla 5.34 se muestran los empleos en detalle, indicando la cantidad necesaria de cada uno de ellos y sus sueldos en dolares. Se estima a partir de esto el costo fijo anual del capital humano para la operación.

Tabla 5.34: Costos asociados al capital humano [EP].

| Cargo | Sueldo mensual [US\$] | Cantidad | Costo mensual [US\$] | Costo anual [US\$] |
|----------------------------------|-----------------------|-----------|----------------------|--------------------|
| Superintendente de ambas plantas | \$ 6.200 | 1 | \$ 6.200 | \$ 74.400 |
| Jefe de planta solar | \$ 4.340 | 1 | \$ 4.340 | \$ 52.080 |
| Jefe de planta desalinizadora | \$ 4.340 | 1 | \$ 4.340 | \$ 52.080 |
| Jefe de mantenimiento | \$ 4.340 | 1 | \$ 4.340 | \$ 52.080 |
| Técnicos profesionales | \$ 1.860 | 5 | \$ 9.300 | \$ 111.600 |
| Operario de monitoreo | \$ 1.240 | 4 | \$ 4.960 | \$ 59.520 |
| Operario de mantenimiento | \$ 1.240 | 3 | \$ 3.720 | \$ 44.640 |
| Operario de planta | \$ 992 | 6 | \$ 5.952 | \$ 71.424 |
| Aseo | \$ 806 | 5 | \$ 4.030 | \$ 48.360 |
| Casino | \$ 682 | 3 | \$ 2.046 | \$ 24.552 |
| Total | | 30 | | \$ 590.736 |

Considerando todo lo previamente calculado, se presenta la tabla final de costos de operación y mantenimiento. A partir de esta y los costos de inversión, además de ciertas suposiciones lógicas, se construye el flujo de caja que permite el cálculo de factibilidad económica del proyecto.

Tabla 5.35: Costos de operación y mantenimiento [EP].

| Item | Costo anual [US\$] |
|-------------------------|---------------------|
| <i>Costos variables</i> | |
| Energía | \$ 416.446 |
| Combustible | \$ 2.967.920 |
| <i>Costos Fijos</i> | |
| Personal | \$ 590.736 |
| Mantenimiento | \$ 1.548.641 |
| Total | \$ 5.523.743 |

5.4.3. Flujo de caja

Para calcular el flujo de caja del proyecto puro y sus variaciones, dependientes de las fuentes de inversión, se utilizan las siguientes suposiciones:

- El precio del litio sube 67 dólares al año.
- Tasa de descuento del 10 %.
- Horizonte de evaluación de 30 años.
- Depreciaciones calculadas de manera lineal con la vida útil financiera.
- Se venden los activos con valor restante y el terreno al finalizar el horizonte.
- Impuesto de primer orden del 27 %.
- Tasa de interés de préstamo del 5 % para proyecto financiado.
- Devolución de préstamo a 20 años.
- Préstamo sin periodo de gracia.
- No se considera IVA.
- Tasa de inversión externa de 10 % de la inversión inicial; para los casos que la presentan.
- Tasa de devolución a la inversión externa de 15 % del flujo operativo.

Para cada caso, hay variables que cambian en cada tipo de proyecto dependiendo de su financiación. En vista de lo anterior se comienza por calcular la factibilidad del proyecto puro, es decir, aquel que no posee ningún tipo de financiación externa, suponiendo que toda la inversión es del propietario del proyecto. Luego, se introducen 6 casos de financiación diferentes, tanto simples como combinados, en los cuales se financia parte del proyecto por préstamos e inversiones externas.

La depreciación de los activos presentes en el proyecto se calcula utilizando la tabla de vidas útiles legales presentada por el Servicio de Impuestos Internos (SII) [71], los costos de inversión y considerando una depreciación lineal en el tiempo. En la tabla 5.36 se presentan los valores calculados para la depreciación de cada activo. Además, se presenta la tabla 5.37 en la que se ven los descuentos por este ítem en el flujo de caja a través de los años.

Tabla 5.36: Depreciación lineal de activos [EP].

| Componente | Inversión | Vida útil legal | Depreciación | Valor residual |
|---------------------------------|------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| Pre calentador | \$ 110.836 | 15 | \$ 7.389 | \$ - |
| Efecto I | \$ 2.416.272 | 15 | \$ 161.085 | \$ - |
| Efecto i | \$71.977.746 | 15 | \$ 4.798.516 | \$ - |
| Condensador | \$ 2.901.366 | 15 | \$ 193.424 | \$ - |
| Bomba salmuera | \$ 7.283 | 6 | \$ 1.214 | \$ - |
| Bomba destilado | \$ 7.270 | 6 | \$ 1.212 | \$ - |
| Bomba alimentación | \$ 7.449 | 6 | \$ 1.242 | \$ - |
| Termocompresor | \$ 3.836 | 15 | \$ 256 | \$ - |
| Colectores | \$11.588.438 | 15 | \$ 772.563 | \$ - |
| Bomba presurizadora | \$ 7.258 | 6 | \$ 1.210 | \$ - |
| Concreto | \$ 2.799.566 | 50 | \$ 55.991 | \$ 1.119.826 |
| HEX | \$ 5.228 | 15 | \$ 349 | \$ - |
| Caldera | \$ 2.723.074 | 15 | \$ 181.538 | \$ - |
| Instalación | \$12.865.944 | 10 | \$ 1.286.594 | \$ - |
| Instrumentación | \$ 5.146.378 | 15 | \$ 343.092 | \$ - |
| Mecánica | \$10.292.756 | 10 | \$ 1.029.276 | \$ - |
| Electrica | \$ 5.146.378 | 10 | \$ 514.638 | \$ - |
| Edificios (servicios incluidos) | \$ 9.006.161 | 50 | \$ 180.123 | \$ 3.602.464 |
| Instalación de los servicios | \$14.152.539 | 10 | \$ 1.415.254 | \$ - |

Tabla 5.37: Depreciación a través de los años de evaluación [EP].

| Hasta los 6 años | Hasta los 10 años | Hasta los 15 años | Hasta los 30 años |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| \$ 10.944.964 | \$ 10.940.088 | \$ 7.208.964 | \$ 750.752 |

Es necesario considerar casos de financiación en el proyecto, ya que rara vez las empresas dueñas de estas grandes obras aportan todo el dinero para su construcción y puesta en marcha. Usualmente, se piden préstamos de diferentes características a entidades financieras privadas o estatales las cuales, dependiendo de la rentabilidad del proyecto así como de otros motivos, entregan diferentes porcentajes de financiamiento a cambio de tasas de interés bastante elevadas. Otra manera de financiar un proyecto de ingeniería es por medio de la búsqueda de financiación externa la cual, por una tasa determinada de inversión, recibe réditos anuales equivalentes a un cierto porcentaje de los ingresos operativos.

Para este proyecto en particular, se descarta el aporte de financiamiento estatal debido al actual estado del mercado del litio en Chile. En consideración de lo anterior, se presentan tres casos con financiamiento bancario del 20, 40 y 60% de la inversión inicial. Sumado a esto, se presentan otros tres casos en los que a las financiaciones anteriores, se le agrega una inversión externa del 10% de la inversión inicial, creando así los 6 casos mencionados anteriormente. En la tabla 5.38 se presentan todos los casos financieros estudiados así como sus principales características distintivas; para cada uno se introduce una abreviación.

Tabla 5.38: Casos financieros analizados [EP].

| | Porcentaje de préstamo [%] | Tasa de interés [%] | Periodo de préstamo [años] | Tasa de IE [%] | Tasa de pago a los IE [%] |
|---|----------------------------|---------------------|----------------------------|----------------|---------------------------|
| Proyecto Puro [PP] | 0% | 0% | 0 | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20% [PF20] | 20% | 5% | 20 | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 40% [PF40] | 40% | 5% | 20 | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 60% [PF60] | 60% | 5% | 20 | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20% + Inversión Externa [PF20IE] | 20% | 5% | 20 | 10% | 15% |
| Proyecto Financiado 40% + Inversión Externa [PF40IE] | 40% | 5% | 20 | 10% | 15% |
| Proyecto Financiado 60% + Inversión Externa [PF60IE] | 60% | 5% | 20 | 10% | 15% |

A partir de las características descritas en la tabla anterior, es posible, y necesario, comparar los parámetros de decisión clave para la evaluación de proyectos: el VAN y la TIR. El primero, correspondiente al valor actual neto, mide el valor presente del dinero que genera un proyecto en particular, esto es, el valor del dinero generado en ese período; ajustado por una tasa de descuento. Si el valor de este es positivo, el proyecto debería realizarse. Por su parte, la tasa interna de retorno mide la media geométrica de los rendimientos futuros esperados de la inversión en el proyecto. En palabras más simples, mide el valor que debe tener la tasa de descuento para que el VAN sea cero, o lo que es lo mismo, para que la rentabilidad sea cero. Por lo tanto, si la TIR es mayor a la tasa de descuento, el proyecto es viable.

Se presenta la tabla 5.39 y la figura 5.35, en ellas, se puede ver cómo varía cada parámetro de rendimiento económico del proyecto dependiendo del caso. Los números 1 indican el caso base analizado, esto cobrará sentido en la sección de sensibilidad. Analizando el gráfico se puede ver de manera directa cómo agregar financiamiento por deuda aumenta de manera considerable los indicadores. Esto se debe a que, al tener que pagar una menor inversión inicial y separar ese pago a través de años consecutivos (en especial mientras mayor sea el plazo de pago), el pago de esa deuda, aunque cargada con intereses, disminuye su valor acorde con la tasa de descuento del dinero. Lo expuesto se produce puesto que a medida que el dinero va perdiendo su valor inicial a través de los períodos, el dinero generado por la producción compensa de manera excesiva ese pago inicial. Así, separando la devolución del pago a la inversión de la entidad financiera, se pueden amortizar los gastos y aumentar los indicadores.

Tabla 5.39: Indicadores económicos de cada caso [EP].

| | VAN [US\$] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PP.1 [%] | Variación TIR respecto a PP.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|-----------------|----------------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| PP.1 | \$ 371.448.944 | 27% | 0% | 0% | 4 |
| PF20.1 | \$ 387.965.268 | 32% | 4% | 17% | 4 |
| PF40.1 | \$ 404.481.591 | 39% | 9% | 45% | 3 |
| PF60.1 | \$ 420.997.914 | 55% | 13% | 101% | 2 |
| PF20IE.1 | \$ 322.412.654 | 31% | -13% | 13% | 4 |
| PF40IE.1 | \$ 359.631.189 | 42% | -3% | 53% | 3 |
| PF60IE.1 | \$ 396.849.724 | 67% | 7% | 145% | 2 |

En la tabla se vislumbra cómo la TIR de los proyectos financiados es siempre mayor al proyecto puro. Esto significa que existe, para todos los casos de financiamiento, una mayor oportunidad de reinversión del dinero a través del período de estudio seleccionado, por ende, si se hace de manera

adecuada, podría aumentar los réditos. Cabe destacar, eso si, que es el financiamiento bancario por deuda el que fomenta este aumento, es más, el financiamiento por inversiones externas tiene a disminuir los indicadores. Prueba de esto es la baja en el VAN de los proyectos PF20EI.1 y PF40EI.1 con respecto al proyecto puro. Esta disminución en indicadores se debe, principalmente, a la baja en el flujo de caja libre producido por el retorno que se le debe a los inversionistas. Este, como se calcula en la sección de flujos de capitales, y depende de lo producido en el flujo operativo de cada año, es un egreso que siempre disminuirá la producción final de dinero de cada período, independiente de la tasa de descuento.

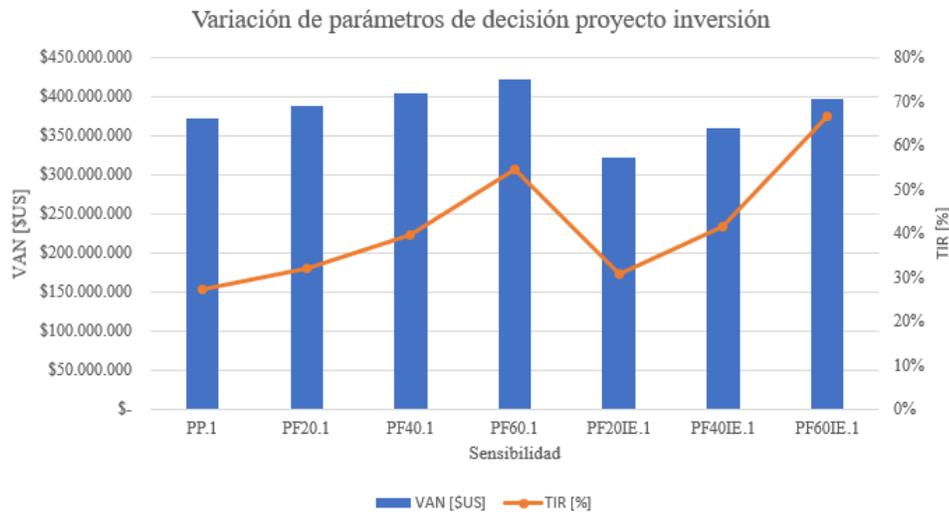


Figura 5.35: VAN y TIR según tipo de financiamiento [EP].

Cabe destacar, de todas formas, que el proyecto es rentable en todas las opciones de financiamiento, por lo que, en principio, es independiente la viabilidad del proyecto de la manera en como se financie. El VAN y la TIR de todos los casos es bastante favorable, entregando un buen primer acercamiento sobre la factibilidad económica del proyecto como tal. Considerando lo anterior, es necesario realizar un estudio de sensibilidades de los diferentes casos. Esto se debe a que las suposiciones y aproximaciones hechas para calcular los costos en esta etapa de ingeniería, suelen variar bastante en el tiempo, por lo mismo, es pertinente estudiar la variación de los indicadores económicos con la variación de parámetros clave.

5.4.4. Análisis de sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad se decide dividir el estudio en varias fases. En primer lugar, se procede a estudiar las variaciones de los parámetros del proyecto puro. Se busca con esto, entender las fluctuaciones generales asociadas a la variación de parámetros como costo, inversión y precio de venta. A partir de aquí, se escogerá el caso de peores indicadores, el cual servirá como referencia para las fases siguientes.

Para diferenciar cada variación, se introduce un sistema de etiquetado, donde cada número corresponde a una variación distinta. Los casos en cuestión son mostrados en la tabla 5.40, donde puede verse cómo el precio del litio, los costos variables y la inversión son cambiados en márgenes

de $\pm 30\%$, siguiendo las variaciones esperadas en costos que pueden presentarse en esta etapa de ingeniería.

Proyecto puro

Tabla 5.40: Variaciones para el proyecto puro [EP].

| | Variación Precio del Litio [%] | Variación Inversión [%] | Variación Costo variable [%] |
|-------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| PP.1 | 0 % | 0 % | 0 % |
| PP.2 | 0 % | 0 % | 30 % |
| PP.3 | 0 % | 0 % | -30 % |
| PP.4 | 30 % | 0 % | 0 % |
| PP.5 | -30 % | 0 % | 0 % |
| PP.6 | 0 % | 30 % | 0 % |
| PP.7 | 0 % | -30 % | 0 % |
| PP.8 | -30 % | 30 % | 0 % |

A partir de estas alteraciones en los datos, se construyen los flujos de caja para cada caso en cuestión. La tabla 5.41 muestra los resultados que dichos flujos de caja entregaron. En primer lugar, es claro que los costos variables no influyen mayormente en la rentabilidad del sistema en general. Esto indica que fuertes cambios en los precios del gas y la electricidad no afectan de manera significativa la rentabilidad general del proyecto. Luego, considerando los precios de venta del litio y los costos de inversión, y tomando los máximos y mínimos VAN calculados para cada uno, se puede ver cómo el precio de venta del litio es más significativo que la inversión en los resultados de factibilidad económica, ergo, el proyecto es más sensible al precio del litio que al costo de inversión.

Tabla 5.41: Indicadores económicos de casos del proyecto puro [EP].

| | VAN [\$US] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PP.1 [%] | Variación TIR respecto a PP.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|-------------|----------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| PP.1 | \$ 371.448.944 | 27 % | 0 % | 0 % | 4 |
| PP.2 | \$ 363.145.979 | 27 % | -2 % | -1 % | 4 |
| PP.3 | \$ 379.751.910 | 28 % | 2 % | 1 % | 4 |
| PP.4 | \$ 556.999.231 | 35 % | 50 % | 30 % | 3 |
| PP.5 | \$ 185.898.658 | 19 % | -50 % | -30 % | 6 |
| PP.6 | \$ 303.516.758 | 21 % | -18 % | -23 % | 5 |
| PP.7 | \$ 439.381.131 | 39 % | 18 % | 42 % | 3 |
| PP.8 | \$ 117.966.471 | 14 % | -68 % | -47 % | 7 |

De todas formas, las variaciones en la TIR que genera la inversión son levemente más significativas, por lo que un cambio grande puede significar un límite importante en la capacidad de reinversión del proyecto. Considerando lo analizado, se presenta el caso PP.8, donde se muestra un estudio con las perspectivas pesimistas tanto del precio del litio como de la inversión inicial. Teniendo esto en cuenta, se puede ver cómo el proyecto sigue siendo ampliamente rentable aún en este caso, dando a entender que, dentro de todo, el proyecto genera pocos riesgos.

Otro punto a considerar es el hecho de que el caso PP.8 y PP.5 tienen rentabilidades bastante parecidas, fortaleciendo la idea de que el precio del litio es el parámetro más importante a tener presente cuando se busca la factibilidad del proyecto. En la figura 5.36, se muestra la representación gráfica

de los resultados previamente mencionados. Debido a que el caso PP.8 presenta los indicadores menos favorables, se utilizarán sus variaciones en inversión y precio de venta para analizar las sensibilidades de los casos con financiamiento.

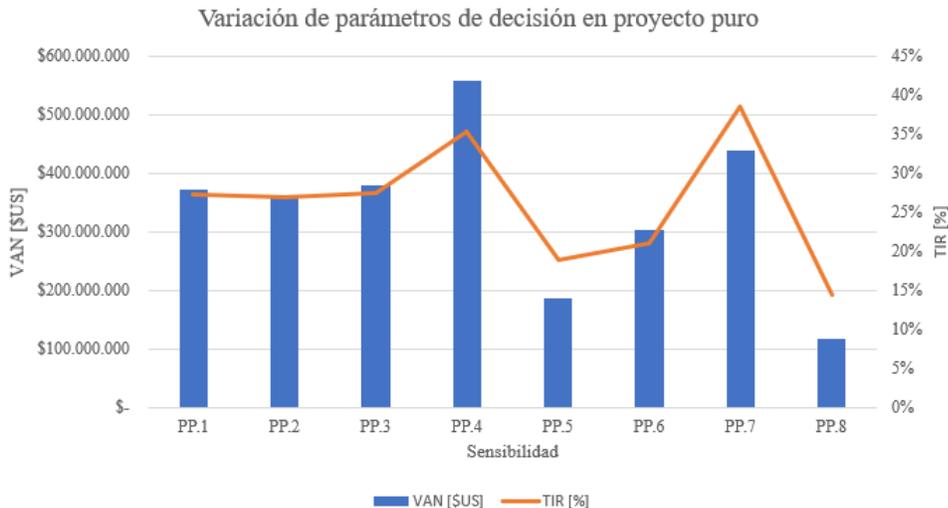


Figura 5.36: VAN y TIR según sensibilidad del proyecto puro [EP].

Proyecto financiado por banca privada

Para el cálculo de sensibilidad del proyecto financiado, se consideran, para cada porcentaje de préstamo, variaciones en la tasa de interés de estos. Se presentan cuatro casos, correspondientes al proyecto financiado original (con tasa de interés del 5%), a aumentos en las tasas de 7,5 y 10% y al proyecto considerando los parámetros de PP.8 y la tasa del 10%. A continuación se introduce la tabla ilustrativa 5.42 para cada caso, cabe destacar que solo se mostrará la tabla con un 20% de préstamo ya que las de 40% y 60% son homólogas.

Tabla 5.42: Variaciones para el proyecto financiado al 20% sin inversión externa [EP].

| | Tasa de interés [%] | Variación Precio del Litio [%] | Variación Inversión [%] |
|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Proyecto Financiado 20% [PF20.1] | 5% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20% [PF20.2] | 7,5% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20% [PF20.3] | 10% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20% [PF20.4] | 10% | -30% | 30% |

Se presentan a continuación las tablas 5.43, 5.44 y 5.45, correspondientes a los resultados de los indicadores económicos para las sensibilidades previamente mencionadas.

Tabla 5.43: Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF20 [EP].

| | VAN [US\$] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF20.1 [%] | Variación TIR respecto a PF20.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|--------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF20.1 | \$ 387.965.268 | 32% | 0% | 0% | 4 |
| PF20.2 | \$ 383.218.450 | 31% | -1% | -1% | 4 |
| PF20.3 | \$ 378.471.633 | 31% | -2% | -2% | 4 |
| PF20.4 | \$ 192.921.346 | 21% | -50% | -34% | 5 |

Tabla 5.44: Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF40 [EP].

| | VAN [US\$] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF40.1 [%] | Variación TIR respecto a PF40.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|---------------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF40.1 | \$ 404.481.591 | 39 % | 0 % | 0 % | 4 |
| PF40.2 | \$ 394.987.956 | 38 % | -2 % | -3 % | 3 |
| PF40.3 | \$ 385.494.322 | 37 % | -5 % | -5 % | 3 |
| PF40.4 | \$ 199.944.035 | 24 % | -51 % | -39 % | 5 |

Tabla 5.45: Indicadores económicos para variación de tasa de interés en PF60 [EP].

| | VAN [US\$] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF60.1 [%] | Variación TIR respecto a PF60.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|---------------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF60.1 | \$ 420.997.914 | 55 % | 0 % | 0 % | 2 |
| PF60.2 | \$ 406.757.462 | 52 % | -3 % | -4 % | 2 |
| PF60.3 | \$ 392.517.010 | 50 % | -7 % | -9 % | 3 |
| PF60.4 | \$ 206.966.724 | 30 % | -51 % | -44 % | 4 |

En ellas, se ilustra cómo las variaciones en la tasa de interés de cada caso no generan un gran cambio en los indicadores económicos. Esto significa que, dado el caso, se podría tomar un préstamo de un alto porcentaje del proyecto aunque este significara mayores tasas de interés lo que, como se explicó anteriormente, genera buenos réditos al largo plazo.

El otro gran punto a considerar es la variación que entrega el último término, correspondiente a aquel con porcentajes pesimistas en precio de venta e inversión. Si se compara con su homólogo de proyecto puro, se puede ver que las variaciones tanto en el VAN como en la TIR son menores en un porcentaje cercano al 10 %. Esto demuestra que el financiamiento por préstamo bancario es deseado a la hora de tratar con variaciones de mercado, ya que diversifica las posibilidades de factibilidad del proyecto, entregando una mayor seguridad frente a los cambios. Para una representación gráfica de la variación, se presenta la figura 5.37 ³.

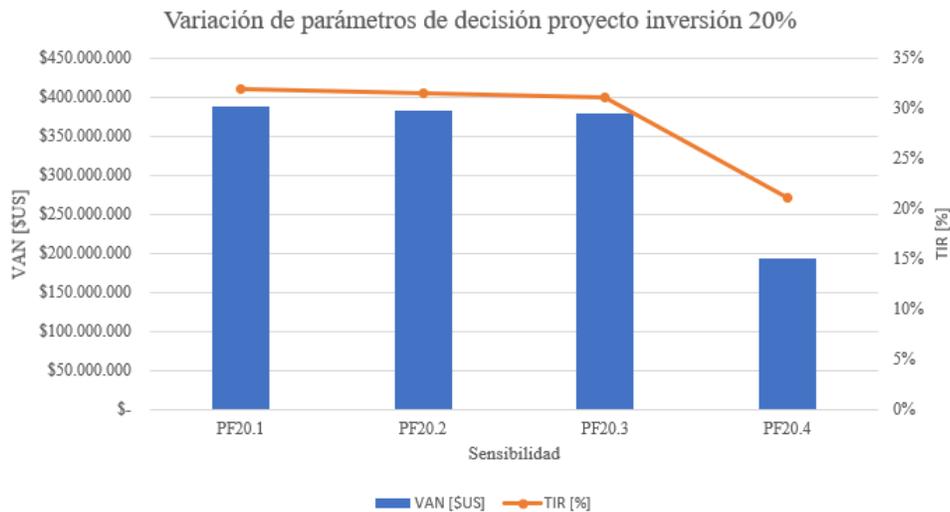


Figura 5.37: VAN y TIR según sensibilidad en proyecto financiado al 20 % [EP].

A partir de lo analizado, se consideran los proyectos con tasas de interés más elevados para el siguiente paso de estudio de sensibilidad, esto, para analizar siempre el caso más pesimista. A

³ Para 40 y 60 % se tienen ilustraciones similares, por lo que se decide no mostrarlas

continuación, se introducen los proyectos con financiamiento mixto, es decir, con inversión externa y préstamo. La sensibilidad que se considera en este caso corresponde a la variación de la tasa de retorno de los inversionistas externos.

Proyecto financiado por banca privada e inversores externos

Como se comentó anteriormente, los inversores externos aportan un 10 % de la inversión inicial y, en el caso sin variación, reciben réditos de 15 % del flujo operativo al año. A continuación, se presenta la tabla 5.46, en donde se muestran los casos de variación para el proyecto financiado de manera mixta. Nuevamente, sólo se mostrará el caso de 20 % de variación ya que los otros dos son homólogos.

Tabla 5.46: Variaciones para el proyecto financiado al 20 % con inversión externa [EP].

| | Tasa de interés [%] | Tasa de pago a los IE [%] | Variación Precio del Litio [%] | Variación Inversión [%] |
|--|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.1] | 10% | 15% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.2] | 10% | 20% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.3] | 10% | 25% | 0% | 0% |
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.4] | 10% | 25% | -30% | 30% |

A partir de estas variaciones se calculan los flujos de caja correspondientes. Se presentan, por consiguiente, en las tablas 5.47, 5.48 y 5.49, los resultados de los indicadores económicos de cada flujo de caja calculado. Se presenta además la figura 5.38, que ilustra de manera gráfica los cambios en los indicadores principales ⁴. En ella, se puede ver que el comportamiento en el cambio de las tasas de retornos son lineales, como era de esperarse. Es más, a manera de comparación, se puede analizar este gráfico en contraste con la figura 5.37 y ver que los comportamientos son bastante similares, dando a entender que las tasas de interés y las tasas de retorno tienen una alta similitud en lo que respecta a la afectación de la economía del proyecto.

Tabla 5.47: Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF20IE [EP].

| | VAN [US\$] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF20.1 [%] | Variación TIR respecto a PF20.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|----------------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF20EL1 | \$ 314.343.065 | 30% | 0% | 0% | 4 |
| PF20EL2 | \$ 285.418.854 | 28% | -9% | -6% | 4 |
| PF20EL3 | \$ 256.494.644 | 26% | -18% | -12% | 4 |
| PF20EL4 | \$ 56.192.961 | 13% | -82% | -57% | 8 |

⁴ Para 40 y 60 % se tienen ilustraciones similares, por lo que se decide no mostrarlas

Tabla 5.48: Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF40IE [EP].

| | VAN [\$US] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF40.1 [%] | Variación TIR respecto a PF40.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|----------------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF40EL1 | \$ 324.213.844 | 38 % | 0 % | 0 % | 3 |
| PF40EL2 | \$ 296.238.997 | 35 % | -9 % | -6 % | 3 |
| PF40EL3 | \$ 268.264.150 | 33 % | -17 % | -12 % | 4 |
| PF40EL4 | \$ 95.135.342 | 16 % | -71 % | -56 % | 7 |

Tabla 5.49: Indicadores económicos para variación de tasa de retorno en PF60IE [EP].

| | VAN [\$US] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF60.1 [%] | Variación TIR respecto a PF60.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|----------------|----------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| PF60EL1 | \$ 334.084.623 | 55 % | 0 % | 0 % | 2 |
| PF60EL2 | \$ 307.059.139 | 51 % | -8 % | -7 % | 3 |
| PF60EL3 | \$ 280.033.656 | 47 % | -16 % | -13 % | 3 |
| PF60EL4 | \$ 120.491.285 | 22 % | -64 % | -59 % | 5 |

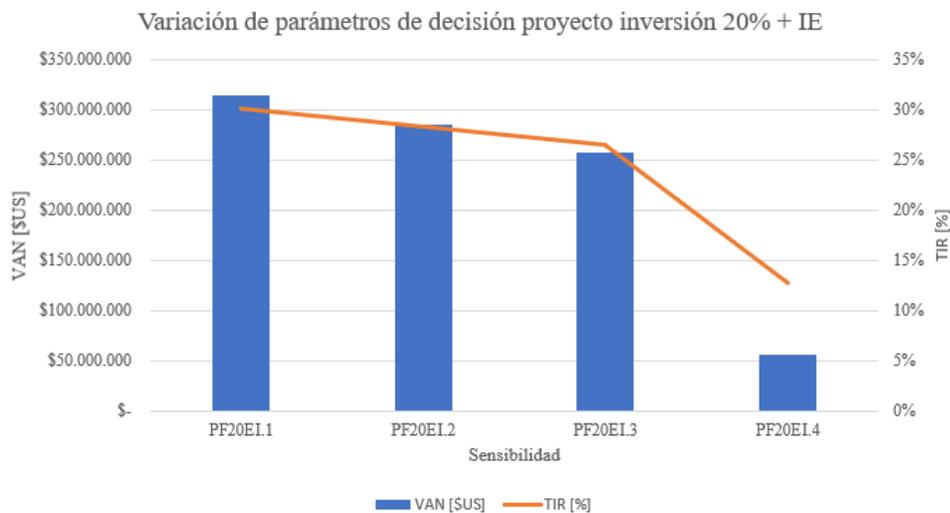


Figura 5.38: VAN y TIR según sensibilidad en proyecto financiado al 20% con inversión externa [EP].

Analizando los datos entregados por el flujo de caja, se puede ver cómo, nuevamente, la variación en las tasas de retorno a los inversionistas no afecta demasiado el rendimiento económico del proyecto. De todas formas, debe notarse esta vez que los cambios son mayores, relativamente hablando, respecto al cambio en la tasa de interés en el análisis anterior.

Otro punto importante a notar es el caso más pesimista, en este sentido, se puede ver cómo la suma de sensibilidades ha traído el VAN del proyecto a su punto más bajo hasta el momento. Esto sugiere que, si bien los aportes más negativos los traen el aumento en la inversión y la baja en el precio del litio, el aumento de tasas y un bajo porcentaje de deuda bancaria pueden generar un proyecto de riesgo mucho mayor.

Considerando lo anterior, se toma el caso PF20IE.4 para realizar el último paso en el análisis de sensibilidad. A partir de este, se variará la tasa de descuento anual del estudio al punto en que el VAN se haga negativo. Esto se hace con el objetivo de cubrir el caso, eventualmente real, en que

todas las especulativas pesimistas efectivamente se cumplan.

Variación de la tasa de descuento

Considerando lo anterior, se introducen tres casos con tasas de descuentos iguales a 10%, 12% y 15%. La tabla 5.50 muestra las tasas de cada caso. A partir de esta variación, se muestra la tabla 5.51 en donde se puede analizar, de manera directa, los indicadores económicos con el cambio de la tasa de descuento.

Tabla 5.50: Variaciones de la tasa de descuento para el caso más pesimista [EP].

| | Tasa de descuento [%] |
|--|-------------------------|
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.4.1] | 10 % |
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.4.2] | 12 % |
| Proyecto Financiado 20 % + Inversión Externa [PF20IE.4.3] | 15 % |

Tabla 5.51: Indicadores económicos para variación de tasa de descuento en PF20IE.4 [EP].

| | VAN [\$US] | TIR [%] | Variación VAN respecto a PF40.1 [%] | Variación TIR respecto a PF40.1 [%] | Retorno de inversión [años] |
|-------------------|----------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| PF20IE.4.1 | \$ 56.192.959 | 13% | 0% | 0% | 8 |
| PF20IE.4.2 | \$ 13.595.968 | 13% | -76% | 0% | 8 |
| PF20IE.4.3 | \$ -31.967.916 | 13% | -157% | 0% | N/A |

Es manifiesto que, a medida que la tasa de descuento se acerca a la TIR calculada, el VAN disminuye de manera considerable. Bajo estas condiciones, una tasa de descuento del 13% generaría un proyecto sin balances positivos ni negativos, trasladando la decisión a factores fuera de lo económico. Se presenta, a manera ilustrativa, la figura 5.39, correspondiente a las variaciones mostradas en la tabla anterior. En ella, se puede ver cómo el aumento de la tasa podría generar pérdidas para este caso en particular.

Cabe destacar, finalmente, que este caso es bastante particular, por lo que es esperable que, de subir la tasa de descuento utilizada, las características del proyecto aún lo hagan altamente rentable. Basta mirar las TIR calculadas para cada caso para darse cuenta de aquello.

El último punto a considerar, el cual no se ha comentado aún, es el del retorno de la inversión. Dentro de los resultados económicos, se puede ver cómo en el mejor de los casos (aquellos con muy baja inversión inicial), el retorno de la inversión puede obtenerse en aproximadamente 2 años. Mientras que en el peor, en 8. Cualquiera fuese el caso, se considera que es un rango bastante aceptable, en especial considerando el horizonte de evaluación del proyecto.

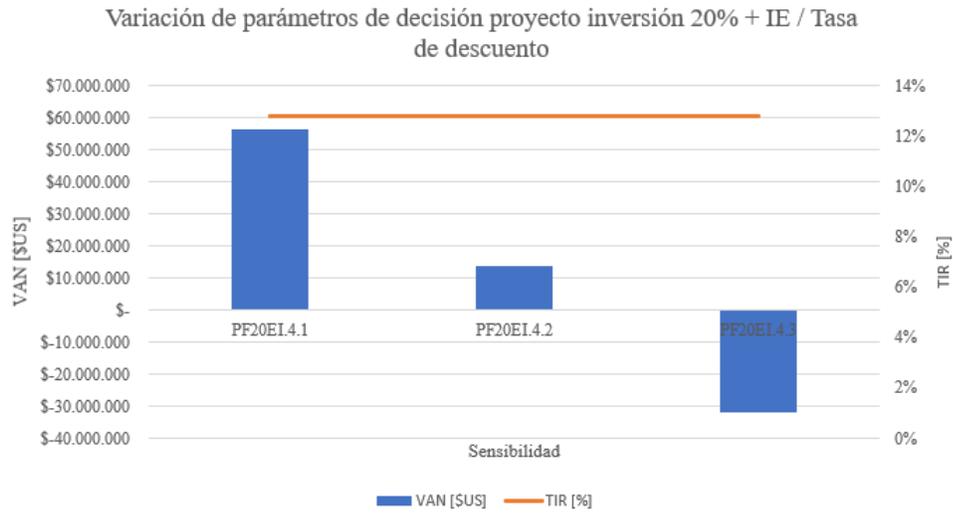


Figura 5.39: VAN y TIR según el cambio de la tasa de descuento en el caso PF20IE.4 [EP].

A través de los análisis realizados se determina que, habiendo considerado una amplia gama de casos posibles, el proyecto posee un bajo riesgo de inversión y un alto grado de rentabilidad. Esto, por consiguiente, asegura la factibilidad económica del proyecto, entregando un amplio espectro de posibilidades de reinversión, mejoramiento y escalamiento.

Discusión y Conclusiones

Se presenta un análisis tecnoeconómico piloto sobre el reemplazo de la tecnología actual de extracción de litio en el Salar de Atacama, basada en la evaporación solar de agua sin recuperación. El nuevo sistema propuesto utiliza un método de desalinización térmica controlada, con recuperación y reinyección de una parte del agua extraída. Se propone una planta tipo *TVC-MED* de 5 efectos, cuya energía está suministrada, principalmente, por radiación solar captada en una planta tipo Fresnel.

Debido a que el estudio buscaba encontrar una tecnología adecuada para el proceso de extracción de litio, se analizaron diferentes tecnologías desalinizadoras existentes en la actualidad. Utilizando bibliografía pertinente y considerando las características de la salmuera del Salar de Atacama en específico, además de otros criterios como la madurez, los costos y el impacto ambiental de cada proceso, se descubrió que el único tipo de desalinización aplicable es el térmico. Así, la capacidad de trabajar, en principio, sin límite de salinidad y con bajo o nulo uso de compuestos químicos nocivos para el medio ambiente del salar, fueron los factores que descartaron el uso de las demás tecnologías en favor del concepto térmico.

Para escoger la tecnología específica de desalinización, se consideró el hecho de que las tecnologías tipo MED poseen una baja temperatura de operación relativas a otras alternativas térmicas. La temperatura a la que trabaja esta (50 a 70 [°C]), le permite operar, usualmente, bajo el límite de la curva de solubilidad de calcio-sulfato, disminuyendo por ende la posibilidad de producción de escamas que puedan afectar el rendimiento del sistema, añadiendo la ventaja de la baja o nula introducción de antiincrustantes que puedan afectar el agua de reinyección al salar. Además, la eficiencia de las plantas MED es la más alta dentro de las plantas no híbridadas, ya que, debido al mejor aprovechamiento del calor latente de los flujos que pasan por ella, la energía que se debe introducir para producir la misma cantidad de destilado es menor. Considerado lo anterior, sumado al hecho de que las plantas híbridas *TVC-MED* poseen una eficiencia 20% mayor con respecto a las MED puras y están en una alta etapa de madurez tecnológica, se escogió esta como la más idónea para su introducción en el proceso de extracción de litio.

Debido a que la zona del estudio es bastante aislada con respecto al resto del país y su radiación solar anual es una de las más altas en el mundo, se propuso que la energía térmica de la planta

fuese suministrada principalmente por un sistema de captación solar, el cual entregaría vapor de agua a alta temperatura al termocompresor para su posterior utilización en el sistema desalador. Debido a esto, se tuvo que considerar el modelamiento básico de una planta CSP dependiente de los requerimientos térmicos calculados para la planta desalinizadora, así como del régimen de operación de la misma.

Luego, se diseñó un modelo computacional de dos partes para que, según los parámetros de entrada introducidos, entregara un flujo de salmuera y destilado óptimo. Se estableció un punto de referencia para la simulación, de $180 \left[\frac{kg}{s} \right]$ de salmuera final; correspondiente a un 20%, aproximadamente, de la producción de la primera etapa del proceso actual de extracción de litio. El modelo creado fue validado de manera exitosa comparando sus resultados con respecto a los de otras plantas, tanto reales como simuladas presentes en la literatura; se encontró que todos los resultados entregados por el modelo se mantenían dentro de un orden de magnitud de diferencia.

Además de la validación anterior, se introdujo un segundo método basado en la respuesta del modelo frente a los cambios en parámetros específicos, comparando su comportamiento con lo esperable en la teoría. A partir de este análisis, se extrajeron tres conclusiones importantes, las dos primeras relacionadas entre sí. En primer lugar, el aumento del número de efectos de este tipo de sistemas, genera un aumento exponencial en el área de intercambio térmico hasta llegar a un punto físicamente inviable. En segundo lugar, la salinidad del agua de alimentación, relacionada al BPE y, por ende, a la temperatura de ebullición de cada efecto, es un limitante importante del número de efectos que puede utilizar de manera efectiva una planta desaladora de este tipo; por ejemplo, en este caso sólo es posible utilizar 5 efectos. Por último, existe un punto óptimo para la presión del vapor motor que maximiza el GOR de toda la planta; además, la maximización del GOR está fuertemente relacionada con la minimización de la razón de atrapamiento (término que relaciona el flujo de vapor motor introducido en el termocompresor, con el flujo de vapor que se extrae en el último efecto).

La segunda parte del modelo computacional introduce un ajuste de áreas de intercambio térmico en pos de la simplicidad de la ingeniería, estableciendo áreas promedio fijas, en contraste con las áreas variables de la primera parte. Esto sacrifica levemente la eficiencia del sistema, a la vez que disminuye la cantidad de destilado final. Sin perjuicio de ello, se decide que los beneficios del ajuste son mayores a las pérdidas generadas, ya que las variaciones de los parámetros anteriores se remiten a 2,06 y 2,04% con respecto al cálculo inicial, respectivamente.

El modelo inicialmente fue ejecutado con una salinidad final supuesta de manera arbitraria; correspondiente a 240.000 [ppm]. Hechos los ajustes mencionados en el párrafo anterior, se procedió a realizar un estudio de sensibilidad en los resultados de la planta a medida que se variaba la salinidad final. Este estudio reveló que existe un límite práctico aproximado, para estas condiciones, de 280.000 [ppm]; a partir de aquí, es evidente que a mayores salinidades se obtiene un error numérico.

Debido a que se buscaba reemplazar la primera etapa del proceso de extracción, se introdujo una comparación entre la salinidad presente de manera natural en el salar y la producida por diferentes salinidades finales (suponiendo la misma fracción de litio). En razón de lo anterior, se concluye que el parámetro de salinidad que permite una producción factible de litio, manteniendo un margen de desviación adecuado a partir del ajuste de áreas, es de 260.000 [ppm].

Se concluye la factibilidad técnica de la planta modelada. Esta entrega como resultados finales

óptimos una producción de salmuera y destilado de $114,2 \left[\frac{kg}{s}\right]$ y $55,62 \left[\frac{kg}{s}\right]$ respectivamente, con una salinidad de la salmuera final de $260.260 [ppm]$. El GOR asociado a esta planta corresponde a $7,71$, su razón de arrastre es $1,72$, consta de 5 efectos y su área de transferencia específica es de $1.821,4 \left[\frac{m^2}{kg/s}\right]$.

La cantidad de salmuera óptima producida por la planta modelada corresponde a aproximadamente el 14% de la producción de la primera etapa, 6% menos que el supuesto de producción inicial. Por otro lado, considerando un déficit hídrico actual de $1.750 \left[\frac{lt}{s}\right]$, la planta piloto alcanza a recuperar aproximadamente el $3,2\%$ de este déficit. Ahora bien, si se escalara la producción al 100% de la primera etapa, se podría recuperar cerca del 23% del déficit hídrico total, aportando de manera importante a la recuperación de los ecosistemas.

Considerando los alcances de este estudio y sus resultados, la recuperación de agua de la primera etapa con respecto al proceso actual no es completa, dejando una diferencia de 38% con respecto al 61% de agua evaporada actualmente. Ese porcentaje restante de agua está siendo trasladado a las siguientes etapas en forma de una salmuera más diluida que la actual, la cual, eventualmente, se sigue evaporando hacia el aire en las siguientes etapas. Teniendo ello en cuenta, sigue siendo positivo el hecho de que cerca del 40% del agua que se perdía en la primera etapa se estaría recuperando.

Con la planta modelada se estableció un régimen de operación de $24 [hrs]$, considerando el costo energético que significarían los estados transientes de la misma. Establecido eso, se modeló la planta de concentración solar que permitiría el funcionamiento del sistema desalador. Así, se llegó a la conclusión de que el sistema óptimo correspondía a una planta tipo Fresnel con $14 [hrs]$ de almacenamiento térmico sensible por concreto y una caldera auxiliar a gas. El factor de capacidad corresponde a $60,4\%$ con un área total del campo (incluido el almacenamiento) de $396.612 [m^2]$. Para cubrir el 100% de la producción de la primera etapa, se utilizaría un área de $2.843.633,2 [m^2]$, considerablemente menor a los $18.600.000 [m^2]$ aproximados que utilizan las piscinas de la primera etapa ⁵.

Se realizó la evaluación suponiendo una producción de litio acorde a la salmuera producida por la planta y la salinidad que entrega la misma. La evaluación proporcionó balances favorables en prácticamente todos los casos analizados, por lo que el reemplazo de la tecnología de desalinización actual por un sistema alternativo no es sólo deseable desde el punto de vista medioambiental, sino que factible económicamente. Se introdujeron variaciones en los costos de inversión, costos variables, precios de venta del litio y tipos de financiamiento con variaciones en sus respectivas tasas de interés. En todos los flujos de caja analizados, salvo en el más desfavorable, se obtuvieron VAN positivos y TIR mayores a la tasa de descuento. Es más, incluso considerando valores de venta del litio 30% menores al actual y costos de inversión 30% mayores al mismo tiempo, se obtuvieron retornos positivos en todos los tipos de financiamiento considerados.

Cabe destacar que, debido a la gran área de transferencia de calor que se necesita para la planta modelada, el mayor costo de inversión (aproximadamente el 77%) estuvo asociado a los evaporadores de los efectos. De esta forma, y debido a que el área de transferencia está relacionada a la salinidad de la salmuera, se concluye que existe una relación clara entre los costos de inversión del proyecto y la salinidad con la que se trabaja. Por su parte, esto nunca había sido un factor relevante

⁵ Google Earth

en el análisis de las distintas fuentes consultadas, principalmente, debido a que el BPE a salinidades correspondientes al agua de mar, no toma demasiado protagonismo.

Considerando lo evaluado en este proyecto y los alcances que no se cubrieron en él, se recomienda un estudio sobre la recuperación de agua de las siguientes etapas. Si bien la salinidad es un gran limitante en el tipo de planta estudiada, las siguientes etapas podrían cubrirse con sistemas pasivos de desalinización, como en la actualidad, pero que incluyan la arista de recuperación hídrica.

Subíndices

| | |
|-------|-----------------------------------|
| i | i-ésimo efecto |
| n | n-ésimo efecto |
| t | Total |
| c | Condensado |
| b | Salmuera |
| v | Vapor |
| vpc | Vapor del precalentador |
| vfb | Vapor de la flashbox |
| vfl | Vapor del flasheo en el efecto |
| f, | Feed o alimentación |
| cw | Agua de enfriamiento |
| s | Flujo caloportador del 1er efecto |
| m | Flujo motor |
| ev | Vapor atrapado |
| ,f | Final |
| start | Puesta en marcha |
| tot | Total |
| in | Entrante |
| out | Saliente |
| comb | Combustible |

Nomenclatura

| | |
|-----------|--|
| EP | Elaboración Propia |
| MSF | Destilación flash de múltiple etapa |
| MED | Destilación de múltiple efecto |
| TVC | Termocompresor |
| T | Temperatura |
| P | Presión |
| M | Flujo másico |
| X | Salinidad |
| DNI | Radiación normal directa |
| CSP | Panel de concentración solar |
| PTC | Colector cilindro parabólico |
| LFR | Colector Fresnel lineal |
| TDS | Sólidos totales disueltos |
| SQM | Sociedad Química y Minera de Chile |
| CORFO | Corporación de fomento de Chile |
| LCE | Carbonato de litio equivalente |
| SMA | Superintendencia del medioambiente |
| TBT | Temperatura máxima de salmuera |
| BPE | Elevación del punto de ebullición |
| NEA | Permisividad de no-equilibrio |
| ER | Razón de expansión |
| CR | Razón de compresión |
| Ra | Razón de atrapamiento |
| Cp | Calor específico |
| U | Coficiente de transferencia de calor |
| LMTD | Diferencia de tempertura media logarítmica |
| n | Número de efectos |
| HTF | Fluido caloportador del almacenamiento |
| HEX | Intercambiador de calor |
| TES | Almacenamiento térmico |
| Q | Calor |
| λ | Calor latente |
| h | Entalpía específica |
| η | Rendimiento |
| PP | Proyecto Puro |
| PF | Proyecto Financiado |
| PF IE | Proyecto Financiado + Inversión Externa |

- [1] T. Tran and V. T. Luong, *Lithium Production Processes*. Elsevier Inc., 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00003-7>
- [2] P. Youssef, R. AL-Dadah, and S. Mahmoud, “Comparative Analysis of Desalination Technologies,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2604–2607, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.258https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214032871>
- [3] J. Tonner, “Barriers to Thermal Desalination in the United States,” Tech. Rep. 144, 2008. [Online]. Available: <https://www.usbr.gov/research/dwpr/reportpdfs/report144.pdf>
- [4] Condorchem Envitech, “Extracción, cristalización y procesos de obtención de compuestos de litio.” [Online]. Available: <https://blog.condorchem.com/extraccion-cristalizacion-procesos-obtencion-compuestos-litio/#extraccion>
- [5] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: processes and systems*, 2nd ed., Elsevier, Ed. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington: Oxford OX5 1GB, UK, 2014.
- [6] L. Ramilo, S. Gómez de Soler, and N. Coppari, “Tecnologías para el proceso de desalinización de aguas,” pp. 23–27, 2003. [Online]. Available: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/4D880B81E22FB8F30525811A0062C2A0/\\$FILE/desalinizacion_de_aguas.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/4D880B81E22FB8F30525811A0062C2A0/$FILE/desalinizacion_de_aguas.pdf)
- [7] H. M. Qiblawey and F. Banat, “Solar thermal desalination technologies,” *Desalination*, vol. 220, no. 1-3, pp. 633–644, mar 2008. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916407006650>
- [8] R. Meyer, M. Schlecht, K. Chhatbar, and S. Weber, *Solar resources for concentrating solar power systems*, 2nd ed. Elsevier Ltd., 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00014-1>
- [9] Sopelia, “Extracto de imágenes.” [Online]. Available: <https://www.energiasolar.lat/>
- [10] K. Lovegrove and W. Stein, “Introduction to concentrating solar power technology,” *Concentrating Solar Power Technology*, no. 1991, pp. 3–17, 2021.
- [11] W.-D. Steinmann, *Thermal energy storage systems for concentrating solar power plants*. Elsevier Ltd., 2021.

- [12] D. Laing, T. Bauer, D. Ehmann, and C. Bahl, "Development of a thermal energy storage system for parabolic trough power plants with direct steam generation," *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 132, no. 2, 2010.
- [13] T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Laing, and R. Tamme, "Thermal Energy Storage Materials and Systems," *Annual Review of Heat Transfer*, vol. 15, no. 15, pp. 131–177, 2012.
- [14] H. Alonso, "Origen De Los Componentes Y Balance Salino," *Revista Geologica de Chile*, vol. 23, no. 2, pp. 113–122, 1996.
- [15] 17. Dirección General de Aguas, "Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama," Tech. Rep., 2004.
- [16] U. de Chile, "Explorador Solar," 2017. [Online]. Available: <http://solar.minenergia.cl/inicio>
- [17] G. Lagos, *El litio: un nuevo recurso para Chile.*, 1st ed., U. de Chile, Ed. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 1986.
- [18] SQM, "Sustainability of lithium production in Chile," Tech. Rep., 2020.
- [19] R. Poveda, "Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en Chile," pp. 7–98, 2020. [Online]. Available: www.cepal.org/apps
- [20] S. Schawarz, V. Pérez, and M. C. Betancour, "Mercado Internacional del Litio y su potencial en Chile," *Comisión Chilena del Cobre*, pp. 1–62, 2018. [Online]. Available: https://www.cochilco.cl/MercadodeMetales/Mercado_Internacional_del_Litio.pdf
- [21] Amphos21, "Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Etapa III. Informe Final. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama," Tech. Rep., 2018.
- [22] W. Liu, D. B. Agusdinata, and S. W. Myint, "Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 80, no. April, pp. 145–156, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>
- [23] Superintendencia del Medioambiente, "Alegato de CORFO frente a la Superintendencia del Medioambiente por irregularidades en el balance hídrico del Salar de Atacama," 2018.
- [24] E. Bitrán, "Sanción presentada por CORFO ante la Superintendencia del Medioambiente en contra de SQM," 2017.
- [25] Superintendencia de Medio Ambiente de Chile, "Formulación de Cargos SMA a SQM," pp. 1–46, 2016. [Online]. Available: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/Sancionatorio/Ficha/1459>
- [26] R. (Albermale), "Escrito presentado por Rockwood a la SMA en contra de SQM," 2017.
- [27] B. Jerez Henríquez, "IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DE LA EXTRACCIÓN DE LITIO EN LAS CUENCAS DE LOS SALARES ALTOANDINOS DEL CONO SUR," pp. 1–55, 2018.
- [28] I. C. Karagiannis and P. G. Soldatos, "Water desalination cost literature: review and assessment," *Desalination*, vol. 223, no. 1-3, pp. 448–456, 2008.
- [29] H. Nassrullah, S. F. Anis, R. Hashaikeh, and N. Hilal, "Energy for desalination: A state-of-the-art review," *Desalination*, vol. 491, no. June, 2020.
- [30] A. Ros Moreno, "El agua. Desalación (4/4)," 2011. [Online]. Available: <http://www>.

- [31] J. J. Feria-Díaz, M. C. López-Méndez, J. P. Rodríguez-Miranda, L. C. Sandoval-Herazo, and F. Correa-Mahecha, “Commercial thermal technologies for desalination of water from renewable energies: A state of the art review,” *Processes*, vol. 9, no. 2, pp. 1–22, 2021.
- [32] A. Al-Karaghoulí and L. L. Kazmerski, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 343–356, 2013.
- [33] M. T. Ali, H. E. Fath, and P. R. Armstrong, “A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 4187–4199, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.012>
- [34] A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J. M. Wie, “Advances in seawater desalination technologies,” *Desalination*, vol. 221, no. 1-3, pp. 47–69, 2008.
- [35] A. D, B. J, Z. E, M. . S, and L. J, “Comparación económica de procesos de desalación de agua de mar: el reto de la destilación multi-efecto con energía solar,” pp. 1–8, 2002.
- [36] J. Cánovas Cuenca, “Report on water desalination status in the mediterranean countries,” Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, Murcia, Tech. Rep., 2012.
- [37] O. J. Morin, “Design and operating comparison of MSF and MED systems,” *Desalination*, vol. 93, no. 1-3, pp. 69–109, 1993.
- [38] P. Palenzuela, A. S. Hassan, G. Zaragoza, and D. C. Alarcón-Padilla, “Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant,” *Desalination*, vol. 337, no. 1, pp. 31–42, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029>
- [39] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, “Development of a steady-state mathematical model for MEE-TVC desalination plants,” *Desalination*, vol. 351, pp. 9–18, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.018>
- [40] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, *Fundamentals of Salt Water Desalination.* Department of Chemical Engineering, College of Engineering and Petroleum, Kuwait University: Elsevier, Amsterdam., 2002.
- [41] S. Zhou, L. Gong, X. Liu, and S. Shen, “Mathematical modeling and performance analysis for multi-effect evaporation/multi-effect evaporation with thermal vapor compression desalination system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, no. November 2018, p. 113759, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113759>
- [42] K. M. Bataineh, “Multi-effect desalination plant combined with thermal compressor driven by steam generated by solar energy,” *Desalination*, vol. 385, pp. 39–52, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.011>
- [43] M. A. Darwish and A. Alsairafi, “Technical comparison between TVC/MEB and MSF,” *Desalination*, vol. 170, no. 3, pp. 223–239, 2004.
- [44] M. L. Elsayed, W. Wu, and L. C. Chow, “High salinity seawater boiling point elevation: Experimental verification,” *Desalination*, vol. 504, no. December 2020, p. 114955, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114955>

- [45] UNAM, “Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD).” [Online]. Available: [https://www.ier.unam.mx/\\$\sim\\$Sojs/pub/HeatExchanger/node18.html#Grafico2](https://www.ier.unam.mx/\simSojs/pub/HeatExchanger/node18.html#Grafico2)
- [46] M. M. Ashour, “Steady state analysis of the Tripoli West LT-HT-MED plant,” *Desalination*, vol. 152, no. 1-3, pp. 191–194, 2003.
- [47] CNE, PNUD, and UTFSM, “Irradiancia Solar En Territorios,” 2008.
- [48] G. Alva, L. Liu, X. Huang, and G. Fang, “Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, no. October 2016, pp. 693–706, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- [49] H. Jin, H. Hong, and R. Wang, *Hybridization with conventional fossil plants*. Elsevier Ltd., 2021.
- [50] NREL, “SAM.” [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/>
- [51] S. Bigham, R. KouhiKamali, and M. P. Zadeh, “A general guide to design of falling film evaporators utilized in multi effect desalination units operating at high vapor qualities under a sub-atmospheric condition,” *Energy*, vol. 84, pp. 279–288, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.099>
- [52] C. Temstet, G. Canton, J. Laborie, and A. Durante, “A large high-performance MED plant in Sicily,” *Desalination*, vol. 105, no. 1-2, pp. 109–114, 1996.
- [53] R. Deng, L. Xie, H. Lin, J. Liu, and W. Han, “Integration of thermal energy and seawater desalination,” *Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 4368–4374, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.025>
- [54] F. N. Alasfour, M. A. Darwish, and A. O. Bin Amer, “Thermal analysis of ME-TVC+MEE desalination systems,” *Desalination*, vol. 174, no. 1, pp. 39–61, 2005.
- [55] C. Lagos, “Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos : Litio,” Tech. Rep., 2009.
- [56] CISE, “Rol de la Concentración Solar de Potencia en el Sistema Eléctrico Nacional Sistema Eléctrico Nacional (SEN),” 2019.
- [57] D. Laing, D. Lehmann, M. Fi, and C. Bahl, “Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants,” *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 131, no. 4, pp. 0410071–0410076, 2009.
- [58] N. Ghaffour, J. Bundschuh, H. Mahmoudi, and M. F. Goosen, “Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems,” *Desalination*, vol. 356, pp. 94–114, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024>
- [59] X. Xu, K. Vignarooban, B. Xu, K. Hsu, and A. M. Kannan, “Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1106–1131, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.015>
- [60] M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah, and R. Saidur, “A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, no. April, pp. 987–1018, 2018.

- [61] J. Sun, *Hybrid solar power system*. Elsevier Inc., 2021, no. 1.
- [62] G. Morin, J. Dersch, W. Platzer, M. Eck, and A. Häberle, “Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 1–12, 2012.
- [63] I. B. Askari and M. Ameri, “Techno economic feasibility analysis of Linear Fresnel solar field as thermal source of the MED/TVC desalination system,” *Desalination*, vol. 394, pp. 1–17, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.04.022>
- [64] M. A. Jamil, M. W. Shahzad, and S. M. Zubair, “A comprehensive framework for thermoeconomic analysis of desalination systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 222, no. August, p. 113188, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113188>
- [65] “McGrawHill Cost Estimations.” [Online]. Available: <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/%0A>
- [66] I. Manzanera, *COSTENGINEERINGTOOLS_{and}TECHNIQUES*, 2011.
- [67] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, “Exergy and thermo-economic analysis for MED-TVC desalination systems,” *Desalination*, vol. 447, no. February, pp. 29–42, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.008>
- [68] *Revista EI*, “Tarifa Eléctrica.” [Online]. Available: <https://www.revistaei.cl/2011/07/15/tarifa-electrica-de-uso-industrial-en-chile-es-la-tercera-mas-cara-del-cono-sur/#>
- [69] Purity, “Purity Pump Catalogue.” [Online]. Available: https://www.linkjoint.cn/uploads/7_PURITY_50HZ_PUMP_CATALOG_202003-2.pdf?gclid=CjwKCAiAjoerBhAJEiwAYY3nDPGF96trEuI6miiee-R9uhjbIOvEJuFXxddHN6bQoaGu9oIacd-KgRoCT1cQAvD_BwE
- [70] G. P. Prices, “Gas Prices.” [Online]. Available: https://es.globalpetrolprices.com/natural_gas_prices/#hl15
- [71] SII, “Depreciaciones legales.” [Online]. Available: http://www.sii.cl/valores_y_fechas/tabla_vida_util_activo_inmovilizado.html

Validación de Correlaciones

Se introduce una tabla en la que se muestran los cálculos realizados con las fórmulas para las correlaciones. Se comparan estas con datos extraídos de tablas de vapor reales y se confirma su validez por la baja diferencia porcentual en todo punto.

Tabla A.1: Datos calculados con las correlaciones [EP].

| T[°C] | P[bar] | hl[kJ/kg] | hlv[kJ/kg] | hv[kJ/kg] | Cp[kJ/kg C] |
|--------------|---------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 20 | 0,0238 | 84,5 | 2453,0 | 2537,5 | 4,181 |
| 21 | 0,0253 | 88,7 | 2450,6 | 2539,4 | |
| 22 | 0,0269 | 92,9 | 2448,3 | 2541,2 | |
| 23 | 0,0286 | 97,1 | 2446,0 | 2543,1 | |
| 24 | 0,0304 | 101,4 | 2443,6 | 2545,0 | |
| 25 | 0,0322 | 105,6 | 2441,3 | 2546,8 | 4,178 |
| 26 | 0,0342 | 109,8 | 2438,9 | 2548,7 | |
| 27 | 0,0363 | 114,0 | 2436,5 | 2550,5 | |
| 28 | 0,0385 | 118,2 | 2434,2 | 2552,4 | |
| 29 | 0,0408 | 122,4 | 2431,8 | 2554,2 | |
| 30 | 0,0432 | 126,7 | 2429,4 | 2556,1 | 4,176 |
| 31 | 0,0457 | 130,9 | 2427,0 | 2557,9 | |
| 32 | 0,0484 | 135,1 | 2424,6 | 2559,7 | |
| 33 | 0,0512 | 139,3 | 2422,2 | 2561,6 | |
| 34 | 0,0541 | 143,6 | 2419,8 | 2563,4 | |

Tabla A.2: Datos calculados con las correlaciones (continuación) [EP].

| T[°C] | P[bar] | hl[kJ/kg] | hlv[kJ/kg] | hv[kJ/kg] | Cp[kJ/kg C] |
|--------------|---------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 35 | 0,0572 | 147,8 | 2417,4 | 2565,2 | |
| 36 | 0,0605 | 152,0 | 2415,0 | 2567,0 | |
| 37 | 0,0639 | 156,2 | 2412,6 | 2568,8 | |
| 38 | 0,0674 | 160,5 | 2410,2 | 2570,7 | |
| 39 | 0,0711 | 164,7 | 2407,8 | 2572,5 | |
| 40 | 0,0750 | 168,9 | 2405,3 | 2574,3 | 4,173 |
| 41 | 0,0791 | 173,2 | 2402,9 | 2576,1 | |
| 42 | 0,0834 | 177,4 | 2400,5 | 2577,9 | |
| 43 | 0,0879 | 181,6 | 2398,0 | 2579,7 | |
| 44 | 0,0926 | 185,9 | 2395,6 | 2581,4 | |
| 45 | 0,0975 | 190,1 | 2393,1 | 2583,2 | |
| 46 | 0,1026 | 194,3 | 2390,7 | 2585,0 | |
| 47 | 0,1079 | 198,6 | 2388,2 | 2586,8 | |
| 48 | 0,1135 | 202,8 | 2385,7 | 2588,6 | |
| 49 | 0,1193 | 207,1 | 2383,3 | 2590,3 | |
| 50 | 0,1254 | 211,3 | 2380,8 | 2592,1 | 4,173 |
| 51 | 0,1317 | 215,5 | 2378,3 | 2593,8 | |
| 52 | 0,1383 | 219,8 | 2375,8 | 2595,6 | |
| 53 | 0,1452 | 224,0 | 2373,3 | 2597,4 | |
| 54 | 0,1524 | 228,3 | 2370,8 | 2599,1 | |
| 55 | 0,1599 | 232,5 | 2368,3 | 2600,8 | |
| 56 | 0,1677 | 236,8 | 2365,8 | 2602,6 | |
| 57 | 0,1758 | 241,0 | 2363,3 | 2604,3 | |
| 58 | 0,1842 | 245,3 | 2360,8 | 2606,1 | |
| 59 | 0,1930 | 249,5 | 2358,3 | 2607,8 | |
| 60 | 0,2022 | 253,8 | 2355,7 | 2609,5 | 4,175 |
| 61 | 0,2117 | 258,0 | 2353,2 | 2611,2 | |
| 62 | 0,2216 | 262,3 | 2350,7 | 2613,0 | |
| 63 | 0,2318 | 266,6 | 2348,1 | 2614,7 | |
| 64 | 0,2425 | 270,8 | 2345,6 | 2616,4 | |

Tabla A.3: Datos calculados con las correlaciones (continuación) [EP].

| T[°C] | P[bar] | hl[kJ/kg] | hlv[kJ/kg] | hv[kJ/kg] | Cp[kJ/kg C] |
|--------------|---------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 65 | 0,2536 | 275,1 | 2343,0 | 2618,1 | |
| 66 | 0,2651 | 279,3 | 2340,5 | 2619,8 | |
| 67 | 0,2771 | 283,6 | 2337,9 | 2621,5 | |
| 68 | 0,2895 | 287,9 | 2335,3 | 2623,2 | |
| 69 | 0,3024 | 292,1 | 2332,7 | 2624,9 | |
| 70 | 0,3158 | 296,4 | 2330,2 | 2626,6 | 4,180 |
| 71 | 0,3297 | 300,7 | 2327,6 | 2628,2 | |
| 72 | 0,3440 | 304,9 | 2325,0 | 2629,9 | |
| 73 | 0,3589 | 309,2 | 2322,4 | 2631,6 | |
| 74 | 0,3744 | 313,5 | 2319,8 | 2633,3 | |
| 75 | 0,3904 | 317,8 | 2317,2 | 2634,9 | |
| 76 | 0,4070 | 322,0 | 2314,6 | 2636,6 | |
| 77 | 0,4241 | 326,3 | 2311,9 | 2638,3 | |
| 78 | 0,4419 | 330,6 | 2309,3 | 2639,9 | |
| 79 | 0,4603 | 334,9 | 2306,7 | 2641,6 | |
| 80 | 0,4793 | 339,2 | 2304,0 | 2643,2 | 4,187 |
| 81 | 0,4990 | 343,5 | 2301,4 | 2644,9 | |
| 82 | 0,5194 | 347,7 | 2298,8 | 2646,5 | |
| 83 | 0,5404 | 352,0 | 2296,1 | 2648,1 | |
| 84 | 0,5622 | 356,3 | 2293,4 | 2649,8 | |
| 85 | 0,5847 | 360,6 | 2290,8 | 2651,4 | |
| 86 | 0,6079 | 364,9 | 2288,1 | 2653,0 | |
| 87 | 0,6319 | 369,2 | 2285,4 | 2654,6 | |
| 88 | 0,6567 | 373,5 | 2282,8 | 2656,3 | |
| 89 | 0,6824 | 377,8 | 2280,1 | 2657,9 | |
| 90 | 0,7088 | 382,1 | 2277,4 | 2659,5 | 4,196 |

Tabla A.4: Errores porcentuales respecto a las tablas de vapor reales [EP].

| Error P | Error hl | Error hlv | Error hv | Error Cp |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 1,67 % | 0,63 % | 0,05 % | 0,02 % | 0,09 % |
| 1,72 % | 0,64 % | 0,05 % | 0,02 % | |
| 1,69 % | 0,64 % | 0,04 % | 0,02 % | |
| 1,72 % | 0,64 % | 0,04 % | 0,02 % | |
| 1,72 % | 0,65 % | 0,04 % | 0,02 % | |
| 1,72 % | 0,65 % | 0,04 % | 0,01 % | 0,09 % |
| 1,72 % | 0,66 % | 0,04 % | 0,01 % | |
| 1,73 % | 0,67 % | 0,04 % | 0,01 % | |
| 1,72 % | 0,68 % | 0,04 % | 0,01 % | |
| 1,72 % | 0,69 % | 0,05 % | 0,01 % | |
| 1,72 % | 0,70 % | 0,05 % | 0,01 % | 0,10 % |
| 1,71 % | 0,71 % | 0,05 % | 0,01 % | |
| 1,70 % | 0,72 % | 0,05 % | 0,01 % | |
| 1,71 % | 0,73 % | 0,05 % | 0,01 % | |
| 1,69 % | 0,75 % | 0,05 % | 0,00 % | |
| 1,68 % | 0,76 % | 0,05 % | 0,00 % | |
| 1,67 % | 0,77 % | 0,05 % | 0,00 % | |
| 1,53 % | 0,78 % | 0,05 % | 0,00 % | |
| 1,65 % | 0,80 % | 0,05 % | 0,00 % | |
| 1,52 % | 0,81 % | 0,06 % | 0,00 % | |
| 1,63 % | 0,82 % | 0,06 % | 0,00 % | 0,15 % |
| 1,12 % | 0,83 % | 0,06 % | 0,00 % | |
| 0,89 % | 0,84 % | 0,06 % | 0,00 % | |
| 0,90 % | 0,86 % | 0,06 % | 0,00 % | |
| 1,15 % | 0,87 % | 0,07 % | 0,00 % | |

Tabla A.5: Errores porcentuales respecto a las tablas de vapor reales (continuación)[EP].

| Error P | Error hl | Error hl_v | Error hv | Error Cp |
|----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| 1,58 % | 0,88 % | 0,07 % | 0,00 % | |
| 1,10 % | 0,89 % | 0,07 % | 0,00 % | |
| 0,88 % | 0,91 % | 0,07 % | 0,00 % | |
| 0,89 % | 0,92 % | 0,08 % | 0,00 % | |
| 1,11 % | 0,93 % | 0,08 % | 0,00 % | |
| 0,63 % | 0,94 % | 0,08 % | 0,00 % | 0,20 % |
| 0,39 % | 0,95 % | 0,09 % | 0,00 % | |
| 0,38 % | 0,96 % | 0,09 % | 0,00 % | |
| 0,56 % | 0,97 % | 0,09 % | 0,00 % | |
| 0,92 % | 0,98 % | 0,10 % | 0,00 % | |
| 1,44 % | 1,00 % | 0,10 % | 0,00 % | |
| 1,03 % | 1,01 % | 0,10 % | 0,00 % | |
| 0,84 % | 1,02 % | 0,11 % | 0,00 % | |
| 0,85 % | 1,03 % | 0,11 % | 0,00 % | |
| 1,03 % | 1,04 % | 0,11 % | 0,00 % | |
| 0,62 % | 1,05 % | 0,12 % | 0,00 % | 0,24 % |
| 0,42 % | 1,06 % | 0,12 % | 0,00 % | |
| 0,40 % | 1,07 % | 0,12 % | 0,00 % | |
| 0,56 % | 1,09 % | 0,13 % | 0,01 % | |
| 0,87 % | 1,10 % | 0,13 % | 0,01 % | |
| 1,33 % | 1,11 % | 0,14 % | 0,01 % | |
| 0,96 % | 1,12 % | 0,14 % | 0,01 % | |
| 0,79 % | 1,13 % | 0,14 % | 0,01 % | |
| 0,79 % | 1,14 % | 0,15 % | 0,01 % | |
| 0,95 % | 1,15 % | 0,15 % | 0,01 % | |
| 0,59 % | 1,17 % | 0,16 % | 0,01 % | 0,25 % |
| 0,41 % | 1,18 % | 0,16 % | 0,01 % | |
| 0,39 % | 1,19 % | 0,17 % | 0,01 % | |
| 0,53 % | 1,20 % | 0,17 % | 0,01 % | |
| 0,79 % | 1,21 % | 0,18 % | 0,01 % | |
| 1,19 % | 1,22 % | 0,18 % | 0,01 % | |
| 0,88 % | 1,23 % | 0,19 % | 0,01 % | |
| 0,73 % | 1,24 % | 0,19 % | 0,02 % | |
| 0,74 % | 1,25 % | 0,19 % | 0,02 % | |
| 0,88 % | 1,26 % | 0,20 % | 0,02 % | |
| 0,57 % | 1,27 % | 0,20 % | 0,02 % | 0,24 % |
| 0,41 % | 1,28 % | 0,21 % | 0,02 % | |
| 0,40 % | 1,29 % | 0,21 % | 0,02 % | |
| 0,52 % | 1,30 % | 0,22 % | 0,02 % | |
| 0,76 % | 1,32 % | 0,22 % | 0,02 % | |
| 1,10 % | 1,33 % | 0,23 % | 0,02 % | |
| 0,83 % | 1,34 % | 0,23 % | 0,02 % | |
| 0,70 % | 1,35 % | 0,24 % | 0,02 % | |
| 0,70 % | 1,36 % | 0,24 % | 0,02 % | |
| 0,83 % | 1,37 % | 0,25 % | 0,02 % | |
| 1,06 % | 1,38 % | 0,25 % | 0,02 % | 0,22 % |

A continuación se presentan los código utilizados en el trabajo.

Código principal

Código B.1: .]Código principal [EP].

```

1 function [GOR,Q,A,Ra,ER,CR,MB]=Modelo7(n,Ts,Tbn,Tcw,XB,Pm,Mm)
2
3 %%Matrices de zeros para guardar datos
4 Pb=zeros(1,n); %Matriz de presiones [kPa]
5 Tb=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas salmuera [C]
6 MBPE=zeros(1,n); %Matriz de Boling Point Elevation [C]
7 Tf=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas de alimentación [C]
8 Tvfl=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas de flash en efectos [C]
9 Tvfb=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas de flash en flashboxes [C]
10 Tv=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas de vapor [C]
11 Tc=zeros(1,n); %Matriz de temperaturas de condensación [C]
12 lambdab=zeros(1,n); %Matriz de calor latente de evaporación sal [kJ/kg]
13 lambdac=zeros(1,n); %Matriz de calor latente de evaporación dest [kJ/kg]
14 lambdafl=zeros(1,n); %Matriz de calor latente flasheo en efecto [kJ/kg]
15 lambdafb=zeros(1,n); %Matriz de calor latente de flashbox [kJ/kg]
16 lambdav=zeros(1,n); %Matriz de calor latente precalentadores [kJ/kg]
17 Cpf=zeros(1,n); %Matriz de capacidades caloricas feed [kJ/kg C]
18 Cpb=zeros(1,n); %Matriz de capacidades caloríficas salmuera [kJ/kg C]
19 Mvfl=zeros(1,n); %Matriz de flujo de vapor flash en efectos [kg/s]
20 Mvfb=zeros(1,n); %Matriz de flujo de vapor flash en flashbox [kg/s]
21 Mv=zeros(1,n); %Matriz de flujo de vapor en efecto [kg/s]
22 Mvv=zeros(1,n); %Matriz de flujo de vapor total [kg/s]
23 Mvpc=zeros(1,n); %Matriz de flujo de vapor en precalentadores [kJ/kg]
24 Mb=zeros(1,n); %Matriz de flujo de salmuera [kg/s]
25 Mf=zeros(1,n); %Matriz de flujo de alimentación [kg/s]
26 Mc=zeros(1,n); %Matriz de flujo de condensado [kg/s]
27 Xb=zeros(1,n); %Matriz de salinidad del concentrado por efecto [ppm]

```

```

28 Upc=zeros(1,n); %Matriz de coeficientes de transferencia calórica PH
29 U=zeros(1,n); %Matriz de coeficientes de transferencia calórica [kJ/m2 C]
30 Ab=zeros(1,n); %Matriz de áreas de intercambio térmico efectos [m2]
31 Apc=zeros(1,n); %Matriz de áreas de intercambio térmico precalentadores[m2]
32 LMTDpc=zeros(1,n); %Matriz logarítmica precalentadores
33 MB=180;
34
35 Rec=62.5; %Porcentaje de recuperación de salmuera
36 Delta=1; %Definición de parámetro inicial
37 while Delta>0.00001
38
39 %Calculos iniciales
40 MF=(MB*100)/Rec; %Flujo de alimentación total
41 Tb(1)=Ts-5; %Suposición de temperatura de salmuera 1er efecto [C]
42 Tb(n)=Tbn; %Temperatura salmuera último efecto [C]
43 DT=(Tb(1)-Tb(n))/(n-1); %Cambio de temperatura entre efectos [C]
44 Nph=n-1; %Número de precalentadores
45 Tf(1)=Tb(1)-5; %Temperatura del primer feed [C]
46 Tf(n)=Tcw+10; %Suposición incremento temperatura en condensador [C]
47 DTph=(Tf(1)-Tf(n))/Nph;%Cambio de temperatura entre precalentadores[C]
48
49 for i=2:n-1
50     Tb(i)=Tb(i-1)-DT; %Temperatura para cada efecto [C]
51     Tf(i)=Tf(i-1)-DTph; %Temperatura para cada feed [C]
52 end
53 for i=1:n
54     Mf(i)=MF/n; %Separación de flujos de alimentación x efecto [kg/s]
55     Pb(i)=Presion(Tb(i)); %Presión de saturación para cada efecto [kPa]
56     lambdab(i)=lambda(Tb(i)); %Calor latente de cada efecto [kJ/kg]
57 end
58 Tf(n)=Tcw+10; %Temperatura del último feed [C]
59 X=MB*XB/MF; %Salinidad del flujo de alimentación [ppm]
60
61 Tv(n)=Tb(n); %Suposición de temperatura de vapor inicial [C]
62 DIF=1; %Parámetro inicial fijado
63 while DIF>0.00001 %Iteración para reducir error por suponer
64     %la tempertaura
65     Pev=Presion(Tv(n)); %Presión de vapor succionado del
66     %último efecto [kPa]
67     Ps=Presion(Ts); %Presión vapor de entrada a 1er efecto [kPa]
68     ER=Pm/Pev; %Razón de expansión
69     CR=Ps/Pev; %Razón de compresión
70     Tm=Temperatura(Pm); %Temperatura del vapor motor [C]
71     PCF=(3*10^-7)*(Pm^2)-(0.0009*Pm)+1.6101; %Factor de correjimiento
72     %de la presión
73     TCF=(2*10^-8)*(Tv(n)^2)-(0.0006*Tv(n))+1.0047; %Factor de
74     %corregimiento de la temperatura
75     Ra=0.235*((Ps^1.19)/(Pev^1.04))*(ER^0.015)*(PCF/TCF); %Razón de
76     %atrapamiento
77     Mev=Mm/Ra; %Flujo de vapor succionado [kg/s]
78     Ms=Mev+Mm; %Flujo de vapor de entrada a 1er efecto [kg/s]
79

```

```

80 %Primer efecto
81 Cpf(1)=Cp(X,Tf(1)); %Capacidad calórica feed [kJ/kgC]
82 Mv(1)=((Ms*lambda(Ts))-(Mf(1)*Cpf(1)*(Tb(1)-Tf(1))))/lambdab(1);
83 %Flujo másico de vapor primer efecto [kg/s]
84 Mb(1)=Mf(1)-Mv(1); %Flujo másico de salmuera primer efecto [kg/s]
85 Xb(1)=(Mf(1)*X)/Mb(1); %Salinidad salmuera
86 MBPE(1)=BPE(Xb(1),Tb(1)); %BPE efecto 1 [C]
87 Tv(1)=Tb(1)-MBPE(1); %Temperatura vapor [C]
88 lambdav(1)=lambda(Tv(1)); %Calor latente en precalentadores
89 Tfprom=(Tf(1)+Tf(2))/2; %Temp. promedio precalentadores [C]
90 Cpfprom=Cp(X,Tfprom); %Cap. Cal. prom PC [kJ/kgC]
91 Mvpc(1)=(Mf(1)*Cpfprom*(Tf(1)-Tf(2)))/lambdav(1); %Flujo másico
92 %precalentadores [kg/s]
93 Mvv(1)=Mv(1)-Mvpc(1); %Flujo másico que entra el efecto 2 [kg/s]
94 Tc(1)=Tv(1)-0.63; %Temperatura de condensación de vapor
95 lambdac(1)=lambda(Tc(1)); %Calor latente de condensación
96 Mc(1)=Mev; %Flujo de destilado 1er efecto [kg/s]
97 Cpb(1)=Cp(Xb(1),Tb(1)); %Capacidad calorífica salmuera
98
99 %Efecto n-esimo
100 for i=2:n
101     Cpf(i)=Cp(X,Tf(i)); %Capacidad calórica feed [kJ/kgC]
102     MBPE(i)=BPE(Xb(1),Tb(i)); %BPE efecto i [C]
103     Tv(i)=Tb(i)-MBPE(i); %Temperatura vapor i [C]
104     lambdav(i)=lambda(Tv(i)); %Calor latente en precalentadores
105     for j=2:n-1
106         Tfprom=(Tf(j)+Tf(j+1))/2; %Temp. promedio precalentadores
107         Cpfprom=Cp(X,Tfprom); %Cap. Cal. prom PC [kJ/kgC]
108         Mvpc(j)=(Mf(j)*Cpfprom*(Tf(j)-Tf(j+1)))/lambdav(j); %Flujo
109         %másico precalentadores [kg/s]
110     end
111     %Flasheo dentro del efecto i
112     Tvfl(i)=Tb(i)+NEA(Tb(i),Tb(i-1),Tv(i));
113     lambdafl(i)=lambda(Tvfl(i));
114     Mvfl(i)=((Mb(i-1)*Cpb(i-1)*(Tb(i-1)-Tvfl(i)))/lambdafl(i));
115     %Vapor generado en el efecto
116     Mv(i)=((Mvv(i-1)*lambdac(i-1))-(Mf(i)*Cpf(i)*(Tb(i)-Tf(i)))+...
117         (Mb(i-1)*Cpb(i-1)*(Tb(i-1)-Tb(i)))+(Mvfl(i)*...
118         lambdafl(i)))/lambdab(i); %Flujo vapor [kg/s]
119     Mb(i)=Mf(i)+Mb(i-1)-Mv(i); %Flujo salmuera [kg/s]
120     Xb(i)=((X*Mf(i))+(Xb(i-1)*Mb(i-1)))/Mb(i); %Salinidad [ppm]
121     Tc(i)=Tv(i)-0.63; %Temperatura condensado [C]
122     %%%
123     MBPE(i)=BPE(Xb(i),Tb(i)); %BPE [C]
124     Tv(i)=Tb(i)-MBPE(i); %Temperatura vapor [C]
125     lambdav(i)=lambda(Tv(i)); %Calor latente [kJ/kg]
126     for j=2:n-1
127         Tfprom=(Tf(j)+Tf(j+1))/2;
128         Cpfprom=Cp(X,Tfprom);
129         Mvpc(j)=(Mf(j)*Cpfprom*(Tf(j)-Tf(j+1)))/lambdav(j);
130     end
131     %Flasheo dentro del efecto i

```

```

132     Tvfl(i)=Tb(i)+NEA(Tb(i),Tb(i-1),Tv(i));
133     lambdafl(i)=lambda(Tvfl(i));
134     Mvfl(i)=((Mb(i-1)*Cpb(i-1)*(Tb(i-1)-Tvfl(i)))/lambdafl(i));
135     %Vapor generado en el efecto
136     Mv(i)=((Mvv(i-1)*lambdac(i-1))-(Mf(i)*Cpf(i)*(Tb(i)-Tf(i)))+...
137         (Mb(i-1)*Cpb(i-1)*(Tb(i-1)-Tb(i)))+(Mvfl(i)...
138         *lambdafl(i)))/lambdab(i);
139     Mb(i)=Mf(i)+Mb(i-1)-Mv(i);
140     Xb(i)=((X*Mf(i))+(Xb(i-1)*Mb(i-1)))/Mb(i);
141     Tc(i)=Tv(i)-0.63;
142     %Flasheo en flashbox de destilado
143     Tvfb(i)=Tc(i)+NEA(Tc(i),Tc(i-1),Tv(i));
144     lambdafb(i)=lambda(Tvfb(i));
145     Mvfb(i)=(Mvv(i-1)*Cpb(i-1)*(Tc(i-1)-Tvfb(i))/lambdafb(i));
146     %Flujos fuera del efecto
147     for j=2:n-1
148         Mvv(j)=Mv(j)-Mvpc(j)+Mvfb(j); %Vapor que entra a cada efecto
149     end
150     Mc(i)=Mvv(i-1)-Mvfb(i)+Mc(i-1); %Cantidad de destilado x efecto
151     %Área de intercambio
152     lambdac(i)=lambda(Tc(i)); %Calor latente de condensación
153     Cpb(i)=Cp(Xb(i),Tb(i)); %Capacidad calorífica salmuera
154     end
155     Pev2=Presion(Tv(n)); %Presión nueva
156     DIF=abs(Pev-Pev2); %Redefinir parámetro y reiterar hasta converger
157     end
158     Mvv(n)=Mv(n)+Mvfb(n)-Mev; %Flujo de vapor del último efecto
159
160     %Ecuaciones condensador
161     LMTDc=((Tv(n)-Tcw)-(Tc(n)-Tf(n)))/log((Tv(n)-Tcw)/(Tc(n)-Tf(n)));
162     Uc=CoefTransCal2(Tv(n)); %Coeficiente de transferencia calórica
163     %del condensador
164     Ac=(Mvv(n)*lambdac(n))/(Uc*LMTDc); %Área de transferencia de calor
165     %específico en el condensador
166     Mcw=(Mvv(n)*lambdac(n))/(Cpf(n)*(Tf(n)-Tcw)); %Flujo de salmuera
167     %entrante
168
169     MC=Mc(n)+sum(Mvpc)+Mvv(n); %Destilado total [kg/s]
170     GOR=MC/Mm; %Gained Output Ratio
171     Q=(Mm*lambda(Tm))/MC; %Calor específico [kJ/kg]
172     MBB=Mb(n); %Cantidad de salmuera final [kg/s]
173     RR=(MBB/MF)*100; %Recovery rate [%]
174     MB=MB-(MBB-MB)/2; %Redefinición de MB
175     Delta=abs(RR-Rec); %Redefinir parámetro hasta converger
176     end
177
178     %%
179     %Áreas
180
181     %Áreas iniciales según datos del modelo
182     %Precalentadores
183     for j=1:n-1

```

```

184     Upc(j)=CoefTransCal2(Tv(j));
185     LMTDpc(j)=((Tv(j)-Tf(j+1))-(Tc(j)-Tf(j)))/log(((Tv(j)-Tf(j+1))...
186         /(Tc(j)-Tf(j))));
187     Apc(j)=(Mf(j)*Cpf(j)*(Tf(j)-Tf(j+1)))/(Upc(j)*LMTDpc(j));
188     end
189     %Efectos
190     %1er efecto
191     U(1)=CoefTransCal1(Tb(1)); %Coeficiente de transferencia calorica
192     %evaporador
193     Ab(1)=(Ms*lambda(Ts))/(U(1)*(Ts-Tb(1))); %Área de transferencia específica
194     %efectos i-ésimos
195     for j=2:n
196         U(j)=CoefTransCal1(Tb(j)); %Coeficiente de transferencia
197         %calorica evaporador
198         Ab(j)=(Mv(j)*lambdac(j))/(U(j)*(Tc(j-1)-Tb(j))); %Área de
199         %transferencia
200         %específica para evaporador
201     end
202     Ae=sum(Ab); %Área de transferencia de calor específico de todos los
203     %evaporadores
204     APH=sum(Apc);
205     A=(Ae+Ac+APH)/MC; %Área de transferencia de calor específico total
206     %
207
208
209     %Promedios de áreas calculadas
210     Apcprom=mean(Apc(1:n-1));
211     Abprom=mean(Ab(2:n));
212
213     %Recalculo de temperatura de flujos a partir de las áreas promedio
214     %y el flujo final n
215
216     Tfnf=zeros(1,n);
217     Tfnf(n)=Tf(n);
218     %Flujo de alimentación
219     for i=1:n-1
220         Tfnf(n-i)=Tfnf(n-i+1)+((Upc(n-i)*Apcprom*LMTDpc(n-i))/(Mf(n-i)...
221             *Cpf(n-i));
222     end
223
224     Mvpcf=zeros(1,n);
225
226     for i=1:n-1
227         Tfprom=(Tfnf(i)+Tfnf(i+1))/2;
228         Cpfprom=Cp(X,Tfprom);
229         Mvpcf(i)=(Mf(i)*Cpfprom*(Tfnf(i)-Tfnf(i+1)))/lambdav(i);
230     end
231
232     %Nuevos flujos y rendimientos
233     Mvf=zeros(1,n);
234     Mvvf=zeros(1,n);
235     Mvflf=zeros(1,n);

```

```

236 Mvfbf=zeros(1,n);
237 Mbf=zeros(1,n);
238 Mcf=zeros(1,n);
239 Xbf=zeros(1,n);
240 MBPEf=zeros(1,n);
241
242 Mvf(1)=Mv(1);
243 Mvvf(1)=Mvv(1);
244 Mbf(1)=Mb(1);
245 Mcf(1)=Mc(1);
246 Xbf(1)=Xb(1);
247 MBPEf(1)=MBPE(1);
248
249 for i=2:n
250     Mvf(i)=(U(i)*Abprom*(Tc(i-1)-Tb(i)))/lambda(i);
251     Mbf(i)=Mf(i)+Mbf(i-1)-Mvf(i);
252     Xbf(i)=((X*Mf(i)+(Xbf(i-1)*Mbf(i-1)))/Mbf(i);
253     Cpb(i)=Cp(Xbf(i),Tb(i));
254     MBPEf(i)=BPE(Xbf(i),Tb(i));
255     Mvflf(i)=((Mbf(i-1)*Cpb(i-1)*(Tb(i-1)-Tvfl(i)))/lambdaf(i));
256     Mvfbf(i)=(Mvvf(i-1)*Cpb(i-1)*(Tc(i-1)-Tvfb(i))/lambdafb(i));
257     for j=2:n-1
258         Mvvf(j)=Mvf(j)-Mvpcf(j)+Mvfbf(j);
259     end
260     Mcf(i)=Mvvf(i-1)-Mvfbf(i)+Mcf(i-1);
261 end
262
263 Mvvf(n)=Mvf(n)+Mvfbf(n)-Mev;
264
265 Acf=(Mvvf(n)*lambdac(n))/(Uc*LMTDc);
266 MCf=Mcf(n)+sum(Mvpcf)+Mvvf(n);
267 GORf=MCf/Mm; %Gained Output Ratio
268 Qf=(Mm*lambda(Tm))/MCf;
269 MBBf=Mbf(n);
270 RRf=(MBBf/MF)*100;
271 Aef=Abprom+Ab(1); %Área de transferencia de calor específico de todos los
272 %evaporadores
273 APHf=Apcprom;
274 Af=((Aef*n)+Acf+(APHf*(n-1)))/MCf;
275
276 end

```

Ahora, se presentan los códigos anexos al código principal.

Presión

Código B.2: .]Código de Presión [EP].

```

1 function x=Presion(T)
2 x=1000*exp((-3892.7/(T+273.15-42.6776))+9.5);
3 end

```

Temperatura

Código B.3: .]Código de Temperatura [EP].

```
1 function x=Temperatura(P)
2 x=(-230.472*log(7.48518*(10^(-8))*P)-3892.7)/log(7.48518*(10^(-8))*P);
3 end
```

Entalpía de saturación de vapor

Código B.4: .]Código de hv [EP].

```
1 function x=HV(T)
2 x=2499.15+1.955*T-1.927*(10^(-3))*(T^2));
3 end
```

Entalpía de saturación de líquido

Código B.5: .]Código de hl [EP].

```
1 function x=HL(T)
2 TF=T*(9/5)+32;
3 x=(-31.92+1.0011833*TF+3.0833326*(10^(-5))*(TF^2))+4.666663*(10^(-8))...
4 *(TF^3)+3.3333334*(10^(-10))*(TF^4))*2.326;
5 end
```

Calor latente

Código B.6: .]Código de λ [EP].

```
1 function x=lambda(T)
2 hll=HL(T);
3 hvl=HV(T);
4 x=hvl-hll;
5 end
```

BPE

Código B.7: .]Código de BPE [EP].

```
1 function x=BPE(X,T)
2 A = (0.2034+(0.1823*(10^-2)*T)+(0.07097*(10^-4)*(T^2)));
3 B = (0.01351+(0.02457*(10^-2)*T)-(0.00872*(10^-4)*(T^2)));
4 x = (A*(X/34460))+(B*((X/34460)^2));
5 end
```

Calor específico

Código B.8: .]Código de C_p [EP].

```
1 function x=Cp(X,T)
2 s=X/1000; %Salinidad de [ppm] a [g/kg]
3 a=4206.8-(6.6197*s)+(1.2288*(10^(-2))*s^2);
```

```

4 b=-1.1262+(5.4178*(10^(-2))*s)-(2.2719*(10^(-4))*s^(2));
5 c=(1.2026*10^(-2))-(5.3566*(10^(-4))*s)+(1.8906*(10^(-6))*s^(2));
6 d=(6.8777*10^(-7))+(1.517*10^(-6))*s)-(4.4268*10^(-9))*s^(2));
7 y=(a+(b*T)+(c*T^(2))+(d*T^(3)));
8 x=y/1000;

```

Coefficiente de transferencia de calor 1

Código B.9: .]Código de U_1 [EP].

```

1 function x=CoefTransCal1(T)
2 y=(1939.4+1.4052*T)-(0.0207525*T^(2))+(0.0023186*T^(3));
3 x=y/1000;

```

Coefficiente de transferencia de calor 2

Código B.10: .]Código de U_1 [EP].

```

1 function x=CoefTransCal2(T)
2 y=(1617.5+0.1567*T)-(0.1825*T^(2))+(0.00008026*T^(3));
3 x=y/1000;

```

NEA

Código B.11: .]Código de NEA [EP].

```

1 function x=NEA(Ti,Tj,Tvi)
2 x=(30*((Tj-Ti)^(0.55))/Tvi);
3 end

```

Áreas de Intercambio Térmico

A continuación se muestra el detalle de las variaciones de los parámetros de la planta cuando se hace la validación del dimensionamiento de áreas.

Tabla C.1: Variación en la temperatura del feed [EP].

| N | T_f | $T_{f,nuevo}$ | Error |
|----------|-------|---------------|--------------|
| 1 | 55 | 55,24 | 0,43 % |
| 2 | 52,91 | 53,49 | 1,08 % |
| 3 | 50,82 | 51,65 | 1,61 % |
| 4 | 48,73 | 49,74 | 2,03 % |
| 5 | 46,64 | 47,75 | 2,32 % |
| 6 | 44,55 | 45,69 | 2,50 % |
| 7 | 42,45 | 43,57 | 2,57 % |
| 8 | 40,36 | 41,37 | 2,44 % |
| 9 | 38,27 | 39,12 | 2,17 % |
| 10 | 36,18 | 36,8 | 1,68 % |
| 11 | 34,09 | 34,43 | 0,99 % |
| 12 | 32 | 32 | 0,00 % |

Tabla C.2: Variación en el flujo másico de condensado [EP].

| N | M_c | $M_{c,nuevo}$ | Error |
|----------|---------|---------------|--------------|
| 1 | 0,9278 | 0,9278 | 0,00 % |
| 2 | 7,8171 | 7,8171 | 0,00 % |
| 3 | 14,5518 | 14,9519 | 2,68 % |
| 4 | 21,2017 | 22,0745 | 3,95 % |
| 5 | 27,8354 | 29,1758 | 4,59 % |
| 6 | 34,5197 | 36,2504 | 4,77 % |
| 7 | 41,3192 | 43,2948 | 4,56 % |
| 8 | 48,2957 | 50,3064 | 4,00 % |
| 9 | 55,5073 | 57,2838 | 3,10 % |
| 10 | 63,008 | 64,226 | 1,90 % |
| 11 | 70,8474 | 71,1326 | 0,40 % |
| 12 | 79,0695 | 78,0038 | -1,37 % |

Tabla C.3: Variación en el flujo másico de precalentadores [EP].

| N | M_{vpc} | $M_{vpc,nuevo}$ | Error |
|----------|-----------|-----------------|--------------|
| 1 | 0,0692 | 0,0581 | -19,10 % |
| 2 | 0,0691 | 0,0606 | -14,03 % |
| 3 | 0,0689 | 0,063 | -9,37 % |
| 4 | 0,0687 | 0,0653 | -5,21 % |
| 5 | 0,0686 | 0,0675 | -1,63 % |
| 6 | 0,0684 | 0,0696 | 1,72 % |
| 7 | 0,0682 | 0,0716 | 4,75 % |
| 8 | 0,0681 | 0,0735 | 7,35 % |
| 9 | 0,0679 | 0,0752 | 9,71 % |
| 10 | 0,0678 | 0,0769 | 11,83 % |
| 11 | 0,0676 | 0,0785 | 13,89 % |

Tabla C.4: Variación en el flujo másico de vapor [EP].

| N | M_v | $M_{v,nuevo}$ | Error |
|----------|-------|---------------|--------------|
| 1 | 6,97 | 6,97 | 0,00 % |
| 2 | 6,8 | 7,19 | 5,42 % |
| 3 | 6,72 | 7,19 | 6,54 % |
| 4 | 6,7 | 7,17 | 6,56 % |
| 5 | 6,75 | 7,14 | 5,46 % |
| 6 | 6,87 | 7,11 | 3,38 % |
| 7 | 7,04 | 7,08 | 0,56 % |
| 8 | 7,28 | 7,05 | -3,26 % |
| 9 | 7,57 | 7,02 | -7,83 % |
| 10 | 7,91 | 6,98 | -13,32 % |
| 11 | 8,29 | 6,95 | -19,28 % |
| 12 | 8,71 | 6,92 | -25,87 % |

Tabla C.5: Variación en el flujo másico de salmuera [EP].

| N | M_b | $M_{b,nuevo}$ | Error |
|----------|--------|---------------|--------------|
| 1 | 12,5 | 12,5 | 0,00 % |
| 2 | 25,16 | 24,77 | -1,57 % |
| 3 | 37,92 | 37,06 | -2,32 % |
| 4 | 50,68 | 49,36 | -2,67 % |
| 5 | 63,4 | 61,89 | -2,44 % |
| 6 | 76 | 74,05 | -2,63 % |
| 7 | 88,43 | 86,43 | -2,31 % |
| 8 | 100,62 | 98,85 | -1,79 % |
| 9 | 112,52 | 111,31 | -1,09 % |
| 10 | 124,08 | 123,79 | -0,23 % |
| 11 | 135,27 | 136,31 | 0,76 % |
| 12 | 146,03 | 148,87 | 1,91 % |

Tabla C.6: Variación en la salinidad [EP].

| N | X_b | $X_{b,nuevo}$ | Error |
|----------|-------|---------------|--------------|
| 1 | 55504 | 55504 | 0,00 % |
| 2 | 55129 | 56002 | 1,56 % |
| 3 | 54882 | 56154 | 2,27 % |
| 4 | 54741 | 56209 | 2,61 % |
| 5 | 54701 | 56220 | 2,70 % |
| 6 | 54757 | 56205 | 2,58 % |
| 7 | 54907 | 56175 | 2,26 % |
| 8 | 55148 | 56134 | 1,76 % |
| 9 | 55479 | 56085 | 1,08 % |
| 10 | 55899 | 56031 | 0,24 % |
| 11 | 56406 | 55972 | -0,78 % |
| 12 | 57000 | 55911 | -1,95 % |

Tabla C.7: Variación en el BPE [EP].

| N | BPE | BPE_{nuevo} | Error |
|----------|--------|---------------|--------------|
| 1 | 0,6101 | 0,6101 | 0,00 % |
| 2 | 0,5959 | 0,6063 | 1,72 % |
| 3 | 0,5834 | 0,5984 | 2,51 % |
| 4 | 0,5723 | 0,5893 | 2,88 % |
| 5 | 0,5625 | 0,5798 | 2,98 % |
| 6 | 0,5538 | 0,5701 | 2,86 % |
| 7 | 0,5463 | 0,5603 | 2,50 % |
| 8 | 0,5398 | 0,5505 | 1,94 % |
| 9 | 0,5342 | 0,5407 | 1,20 % |
| 10 | 0,5295 | 0,5309 | 0,26 % |
| 11 | 0,5257 | 0,5212 | -0,86 % |
| 12 | 0,5227 | 0,5116 | -2,17 % |

Continuidad de Operación de la Planta

Se presentan las tablas de los datos obtenidos al calcular la continuidad de operación de la planta.

Tabla D.1: Potencia de puesta en marcha para cada efecto [EP].

| Qstart [kW] | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|------------|----------|-----------|-----------|
| Efecto/Mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| 1 | 1155,16 | 1146,36 | 1177,68 | 1227,38 | 1286,66 | 1323,53 | 1345,13 | 1324,28 | 1295,77 | 1263,52 | 1231,82 | 1190,72 |
| 2 | 2515,53 | 2492,63 | 2574,12 | 2703,45 | 2857,73 | 2953,66 | 3009,88 | 2955,61 | 2881,43 | 2797,51 | 2715,00 | 2608,07 |
| 3 | 1608,83 | 1592,21 | 1651,34 | 1745,18 | 1857,13 | 1926,74 | 1967,54 | 1928,16 | 1874,33 | 1813,43 | 1753,57 | 1675,98 |
| 4 | 1807,04 | 1785,68 | 1861,71 | 1982,38 | 2126,33 | 2215,83 | 2268,29 | 2217,65 | 2148,44 | 2070,14 | 1993,16 | 1893,39 |
| 5 | 1820,77 | 1795,59 | 1885,20 | 2027,42 | 2197,09 | 2302,58 | 2364,41 | 2304,73 | 2223,15 | 2130,86 | 2040,13 | 1922,54 |
| Total | 8907,34 | 8812,47 | 9150,05 | 9685,80 | 10324,95 | 10722,34 | 10955,24 | 10730,43 | 10423,13 | 10075,46 | 9733,68 | 9290,70 |

Tabla D.2: Potencia de puesta en marcha para cada precalentador [EP].

| Qstart [kW] | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| PC/Mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| 1 | 47,23 | 46,87 | 48,16 | 50,19 | 52,61 | 54,12 | 55,00 | 54,15 | 52,98 | 51,67 | 50,37 | 48,69 |
| 2 | 47,02 | 46,59 | 48,11 | 50,53 | 53,41 | 55,20 | 56,25 | 55,24 | 53,85 | 52,29 | 50,74 | 48,74 |
| 3 | 47,36 | 46,87 | 48,61 | 51,38 | 54,67 | 56,72 | 57,92 | 56,76 | 55,18 | 53,38 | 51,62 | 49,34 |
| 4 | 46,04 | 45,49 | 47,43 | 50,50 | 54,17 | 56,45 | 57,79 | 56,50 | 54,73 | 52,74 | 50,78 | 48,24 |
| Total | 187,65 | 185,83 | 192,31 | 202,59 | 214,86 | 222,49 | 226,96 | 222,65 | 216,75 | 210,07 | 203,51 | 195,01 |

Tabla D.3: Potencia de puesta en marcha del condensador [EP].

| Qstart [kW] | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|-----------|-----------|
| Condensador/Mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
| | 1706,08 | 1677,65 | 1778,83 | 1939,41 | 2130,97 | 2250,08 | 2319,88 | 2252,50 | 2160,40 | 2056,19 | 1953,75 | 1820,99 |

Datos Introducidos en SAM

Solar Resource Library
 The Solar Resource library is a list of weather files on your computer. Choose a file from the library and verify the weather data information below.

The default library comes with only a few weather files to help you get started. Use the download tools below to build a library of locations you frequently model. Once you build your library, it is available for all of your work in SAM.

Filter: Name

| Name | Latitude | Longitude | Time zone | Elevation | Station ID | Source |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|
| blythe_ca_33.617773_-114.588261_psmv3_60_tmy | 33.61 | -114.58 | -8 | 82 | 258971 | NSRDB |
| daggett_ca_34.865371_-116.783023_psmv3_60_tmy | 34.85 | -116.78 | -8 | 561 | 91486 | NSRDB |
| des_moines_ia_41.586835_-93.624959_psmv3_60_tmy | 41.57 | -93.62 | -6 | 263 | 757516 | NSRDB |
| DHTMY_SAM_E_76T03U | -23.5229 | -68.1746 | -4 | 2304 | 00000 | ExpSolar |
| DHTMY_SAM_E_LZLAX | -23.5911 | -68.3949 | -4 | 2305 | 00000 | ExpSolar |

SAM scans the following folders on your computer for valid weather files and adds them to your Solar Resource library. To use weather files stored on your computer, click Add/remove Weather File Folders and add folders containing valid weather files.

C:\Users\Vicente\SAM Downloaded Weather Files

Download Weather Files
 The NSRDB is a database of thousands of weather files that you can download and add to your solar resource library. Download a default typical-year (TMY) file for most long-term cash flow analyses, or choose files to download for single-year or P50/P90 analyses. See Help for details.

One location Multiple locations Advanced download

[For locations not covered by the NSRDB, click here to go to the SAM website Weather Page for links to other data sources.](#)

Weather Data Information
 The following information describes the data in the highlighted weather file from the Solar Resource library above. This is the file SAM will use when you click Simulate.

Weather file:

-Header Data from Weather File

| | | | |
|-----------|--|---|---------------------------------------|
| Latitude | <input type="text" value="-23.5229"/> DD | Location | <input type="text" value="00000"/> |
| Longitude | <input type="text" value="-68.1746"/> DD | Data Source | <input type="text" value="ExpSolar"/> |
| Time zone | <input type="text" value="GMT -4"/> | For NSRDB data, the latitude and longitude shown here from the weather file header are the coordinates of the NSRDB grid cell and may be different from the values in the file name, which are the coordinates of the requested location. | |
| Elevation | <input type="text" value="2304"/> m | | |
| Time step | <input type="text" value="60"/> minutes | | |

-Annual Averages Calculated from Weather File Data

| | | |
|----------------------|--|------------------------------|
| Global horizontal | <input type="text" value="7.36"/> kWh/m ² /day | - Optional Data |
| Direct normal (beam) | <input type="text" value="10.71"/> kWh/m ² /day | |
| Diffuse horizontal | <input type="text" value="0.75"/> kWh/m ² /day | |
| Average temperature | <input type="text" value="14.2"/> °C | |
| Average wind speed | <input type="text" value="2.5"/> m/s | *NaN indicates missing data. |

Design Point Parameters

-Solar Field-

| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| Design point DNI | 620 | W/m ² |
| Target solar multiple | 2.5 | |
| Target receiver thermal power | 57.82 | MWt |
| Field inlet temperature | 50 | °C |
| Field outlet steam quality | 1.00 | |

-Heat Sink-

| | | |
|------------------------------------|--------|-----|
| Heat sink power | 23.126 | MWt |
| Heat sink inlet pressure | 15.5 | bar |
| Heat sink fractional pressure drop | 0.015 | |

-System Availability-

System availability losses reduce the system output to represent system outages or other events.

[Edit losses...](#) Constant loss: 4.0 %
Hourly losses: None
Custom periods: None

System Configuration

| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| Design Point DNI | 620 | W/m ² |
| Target solar multiple | 2.50 | |
| Target receiver thermal power | 57.82 | MWt |

| | | |
|----------------------------|------|-----|
| Field inlet temperature | 50.0 | °C |
| Heat sink inlet pressure | 15.5 | bar |
| Field outlet steam quality | 1.00 | |

Solar Field Design Point

| | | |
|----------------------------------|---------|----------------|
| Single loop aperture | 8217.6 | m ² |
| Loop optical efficiency | 0.746 | |
| Loop thermal efficiency | 0.966 | |
| Total loop conversion efficiency | 0.721 | |
| Total required aperture, SM=1 | 51755.3 | m ² |
| Required number of loops, SM=1 | 7 | |

| | | |
|-----------------------------|----------|----------------|
| Actual number of loops | 16 | |
| Actual aperture | 131481.6 | m ² |
| Actual solar multiple | 2.54 | |
| Actual field thermal output | 58.750 | MWt |

Solar Field Parameters

| | | |
|--|--------|--------------------------|
| Number of modules in boiler section | 16 | |
| Solar elevation for collector nighttime stow | 10 | deg |
| Solar elevation for collector morning deploy | 10 | deg |
| Stow wind speed | 20 | m/s |
| Collector azimuth angle | 0 | deg |
| Design point ambient temperature | 18.2 | °C |
| Tracking power | 0.20 | W/m ² |
| Piping thermal loss coefficient | 0.0035 | W/K-m ² -aper |

Steam Design Conditions

| | | |
|--|------|-----|
| Cold header pressure drop fraction | 0 | |
| Boiler pressure drop fraction | 0 | |
| Average design point hot header pressure drop fraction | 0 | |
| Total solar field pressure drop | 0.00 | bar |
| Freeze protection temperature | 10 | °C |
| Field pump efficiency | 0.85 | |

Mirror Washing

| | | |
|----------------------|------|----------------------|
| Water usage per wash | 0.02 | L/m ² ,ap |
| Washes per year | 12 | |

Plant Heat Capacity

| | | |
|--|-----|---------------------|
| Thermal inertia per unit area of solar field | 2.7 | kJ/K-m ² |
|--|-----|---------------------|

Land Area

| | | | | | | | |
|------------------|-------|------|--------------------------------------|-----|-----------------|-------|-------|
| Solar field area | 32.49 | acre | Non-solar field land area multiplier | 1.2 | Total land area | 38.99 | acres |
|------------------|-------|------|--------------------------------------|-----|-----------------|-------|-------|

Boiler Geometry and Optical Performance

| | | |
|----------------------------|-------|----------------|
| Reflective aperture area | 513.6 | m ² |
| Length of collector module | 44.8 | m |
| Tracking error | 1 | |
| Geometry effects | 0.84 | |
| Mirror reflectivity | 0.935 | |
| Mirror soiling | 0.95 | |
| General optical error | 1 | |

Optical characterization method:

- Solar position table
- Collector incidence angle table
- Incidence angle modifiers

-Solar Position/Collector Incidence Angle Table

| Import... | Export... | Copy | Paste | Rows (zenith): | 11 | Cols (azimuth): | 20 | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|----------|----------|------|----------|----------|----------|---|
| 0 | -180 | -160 | -140 | -120 | -100 | -80 | -60 | -40 | -20 | 0 | 20 | 40 | 60 | ^ |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 10 | 0.98 | 0.974445 | 0.971976 | 0.972847 | 0.97691 | 0.97691 | 0.972847 | 0.971976 | 0.974445 | 0.98 | 0.974445 | 0.971976 | 0.972847 | |
| 20 | 0.93 | 0.922976 | 0.92893 | 0.946005 | 0.954019 | 0.954019 | 0.946005 | 0.92893 | 0.922976 | 0.93 | 0.922976 | 0.92893 | 0.946005 | |
| 30 | 0.84 | 0.838618 | 0.870691 | 0.913021 | 0.940911 | 0.940911 | 0.913021 | 0.870691 | 0.838618 | 0.84 | 0.838618 | 0.870691 | 0.913021 | |
| 40 | 0.72 | 0.729947 | 0.803687 | 0.866961 | 0.900039 | 0.900039 | 0.866961 | 0.803687 | 0.729947 | 0.72 | 0.729947 | 0.803687 | 0.866961 | |
| 50 | 0.55 | 0.591255 | 0.707454 | 0.793509 | 0.83956 | 0.83956 | 0.793509 | 0.707454 | 0.591255 | 0.55 | 0.591255 | 0.707454 | 0.793509 | |
| 60 | 0.34 | 0.432178 | 0.597478 | 0.664006 | 0.693511 | 0.693511 | 0.664006 | 0.597478 | 0.432178 | 0.34 | 0.432178 | 0.597478 | 0.664006 | |
| 70 | 0.13 | 0.265254 | 0.425586 | 0.464496 | 0.477106 | 0.477106 | 0.464496 | 0.425586 | 0.265254 | 0.13 | 0.265254 | 0.425586 | 0.464496 | |
| 80 | 0.01 | 0.113694 | 0.20891 | 0.233255 | 0.238828 | 0.238828 | 0.233255 | 0.20891 | 0.113694 | 0.01 | 0.113694 | 0.20891 | 0.233255 | v |

Specifying solar position table: Rows indicate solar zenith angles (deg), columns are solar azimuth angles (deg)

Specifying collector incidence angle table: Rows indicate longitudinal incidence angles (deg), columns indicate transversal incidence angles (deg)

-Incidence Angle Modifier Coefficients

| | Const | C1 | C2 | C3 | C4 |
|---------------------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Transverse incidence angle modifier | 0.9896 | 0.044 | -0.0721 | -0.2327 | 0 |
| Longitudinal incidence angle modifier | 1.0031 | -0.2259 | 0.5368 | -1.6434 | 0.7222 |

Receiver Geometry and Heat Loss

Polynomial heat loss model

-Polynomial fit heat loss model

| | C0 (W/m) | C1 (W/m-K) | C2 (W/m-K ²) | C3 (W/m-K ³) | C4 (W/m-K ⁴) |
|------------------------------|----------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Steam temperature adjustment | 0 | 0.672 | 0.002556 | 0 | 0 |
| | C0 | C1 (1/(m/s)) | C2 (1/(m/s) ²) | C3 (1/(m/s) ³) | C4 (1/(m/s) ⁴) |
| Wind velocity adjustment | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

-Evacuated tube heat loss model

Receiver Geometry and Heat Loss

Polynomial heat loss model

-Polynomial fit heat loss model-

| | | | | | |
|------------------------------|----------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | C0 (W/m) | C1 (W/m-K) | C2 (W/m-K ²) | C3 (W/m-K ³) | C4 (W/m-K ⁴) |
| Steam temperature adjustment | 0 | 0.672 | 0.002556 | 0 | 0 |
| | C0 | C1 (1/(m/s)) | C2 (1/(m/s) ²) | C3 (1/(m/s) ³) | C4 (1/(m/s) ⁴) |
| Wind velocity adjustment | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

-Evacuated tube heat loss model-

| | | | |
|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------|
| Absorber tube inner diameter | 0.066 m | Absorber flow plug diameter | 0 m |
| Absorber tube outer diameter | 0.07 m | Internal surface roughness | 4.5e-05 |
| Glass envelope inner diameter | 0.115 m | Absorber flow pattern | Annular flow |
| Glass envelope outer diameter | 0.12 m | Absorber material type | 304L |

| | Variation 1 | Variation 2 | Variation 3 | Variation 4* |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| Variant weighting fraction | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Absorber absorptance | 0.96 | 0.96 | 0.8 | 0 |
| Absorber emittance | Value Table 0.1384 | Value Table 0.65 | Value Table 0.65 | Value Table 0.1384 |
| Envelope absorptance | 0.02 | 0.02 | 0 | 0 |
| Envelope emittance | 0.86 | 0.86 | 1 | 0 |
| Envelope transmittance | 0.963 | 0.963 | 1 | 0 |
| <input type="checkbox"/> Broken Glass | | <input type="checkbox"/> Broken Glass | <input checked="" type="checkbox"/> Broken Glass | <input type="checkbox"/> Broken Glass |
| Annulus gas type | Air | Hydrogen | Air | Air |
| Annulus gas pressure (torr) | 0.0001 | 750 | 750 | 0 |
| Estimated avg. heat loss (W/m) | 150 | 1100 | 1500 | 0 |
| Bellows shadowing | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0 |
| Dirt on receiver | 0.98 | 0.98 | 1 | 0 |

-Aggregate Weighted Losses

| | |
|--|-------------|
| Average field temp difference at design | 203.3 °C |
| Heat loss at design | 242.259 W/m |
| Receiver thermal derate | 0.966 |
| Receiver optical derate | 1.000 |
| Collector optical loss at normal incidence | 0.746 |

ANEXO F

Datos de Almacenamiento

A continuación se presentan las tablas comparativas de los diferentes tipos de almacenamiento sensible que existen en el mercado.

| Concepto | Ventajas | Desventajas |
|--|--|--|
| Dos tanques con sales derretidas | <ul style="list-style-type: none"> - Tecnología probada - Entrega calor a temperatura constante durante la descarga <ul style="list-style-type: none"> - Buen comportamiento a carga parcial - Se puede utilizar el fluido caloportador como fluido del campo solar | <ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de congelamiento irreversible en las tuberías - Carga de tuberías inicial complejo - Potencial limitado de reducción de costos por mejoramiento tecnológico - Costos de capital totales dependen fuertemente del costo del sistema de almacenamiento - Volumen de tanques aproximadamente dos veces el volumen del material de almacenamiento <ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de congelamiento irreversible en las tuberías - Carga de tuberías inicial complejo - Material de relleno debe ser similar a la sal - Cerca del 30% del volumen de almacenamiento no puede ser utilizado debido a la capa límite térmica <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura no es constante durante la descarga - La contaminación de las sales debe ser evitada - Bomba externa necesaria |
| Tanque único con sales derretidas | <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de costos debido a la sustitución parcial de sal derretida por material de relleno de bajo costo - Solo se necesita un tanque de almacenamiento | <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura no es constante durante la descarga - La reparación o cambio del intercambiador de calor no es simple - El estrés termomecánico entre el intercambiador de calor y el medio de almacenamiento debe ser considerado - Se debe asegurar un contacto estrecho entre el intercambiador de calor integrado y el medio de almacenamiento <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura no es constante durante la descarga - Necesidad de grandes tanques presurizados - Capacidad de almacenamiento muy limitada - Temperatura máxima limitada |
| Medio sólido con intercambiador de calor integrado | <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de costos debido a los bajos costos de material <ul style="list-style-type: none"> - No hay riesgo de congelamiento - El fluido de trabajo presurizado puede ser utilizado directamente sin necesidad de un intercambiador de calor <ul style="list-style-type: none"> - Bajo riesgo medioambiental | <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura no es constante durante la descarga - La reparación o cambio del intercambiador de calor no es simple - El estrés termomecánico entre el intercambiador de calor y el medio de almacenamiento debe ser considerado - Se debe asegurar un contacto estrecho entre el intercambiador de calor integrado y el medio de almacenamiento <ul style="list-style-type: none"> - La temperatura no es constante durante la descarga - Necesidad de grandes tanques presurizados - Capacidad de almacenamiento muy limitada - Temperatura máxima limitada |
| Acumulador de vapor | <ul style="list-style-type: none"> - Bajo tiempo de respuesta - Alta potencia volumétrica - Alta experiencia de operación en aplicaciones industriales | <ul style="list-style-type: none"> - Solo es atractivo económicamente para presiones bajas de operación - Necesidad de grandes tanques presurizados - Capacidad de almacenamiento muy limitada - Temperatura máxima limitada |
| Cama empaquetada con aire como HTF | <ul style="list-style-type: none"> - No se necesita intercambiador de calor <ul style="list-style-type: none"> - Apropiado para altas temperaturas - Bajo riesgo medioambiental - Se puede alcanzar una temperatura máxima alta <ul style="list-style-type: none"> - Alta experiencia de operación en aplicaciones industriales - Absorción directa de radiación solar | <ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas de presión pueden resultar críticas - Solo para fluidos caloportadores gaseosos - Las distancias entre el campo solar y el almacenamiento deben ser limitadas - Solo existe experiencia de plantas piloto - Cargas parásitas en el transporte de energía pueden ser grandes - La abrasión mecánica de las superficies debe ser controlada |
| Partículas descendentes | <ul style="list-style-type: none"> - Absorción directa de radiación solar | <ul style="list-style-type: none"> - Solo existe experiencia de plantas piloto - Cargas parásitas en el transporte de energía pueden ser grandes - La abrasión mecánica de las superficies debe ser controlada |

Figura F.1: Características cualitativas de los almacenamientos por calor sensible [11]

Tabla F.1: Características cuantitativas de almacenadores líquidos de calor sensible [11].

| Medio | Densidad [kg/m ³] | Capacidad calorífica específica [J/kg/m ³] | Viscosidad dinámica [10 ⁻³ Pas] | Diferencia de temperatura = 100 [°K] | |
|---------------------------------|-------------------------------|--|--|--|---|
| | | | | Capacidad de almacenamiento específico por volumen [kWh/m ³] | Costos estimados por capacidad [\$/kWh] |
| Agua saturada (250 °C, 40 bar) | 798 | 4,865 | 0,1 | 100 | - |
| Aceite mineral (<320 °C) | 800 | 2,4 | 0,4 | 53 | 17 |
| Aceite sintético (<400 °C) | 755 | 2,4 | 0,25 | 50 | 67 |
| Sal nitrada (>220 °C, <570 °C) | 1950 | 1,5 | 2 a 3 | 81 | 22 |
| Sodio líquido (>98 °C, <890 °C) | 900 | 1,2 | 0,3 | 32 | 67 |

Tabla F.2: Características cuantitativas de almacenadores sólidos de calor sensible [11].

| Medio | Densidad [kg/m ³] | Capacidad calorífica específica [kJ/kg/m ³] | Conductividad térmica [W/mK] | Diferencia de temperatura = 100 [°K] | |
|----------------|-------------------------------|---|------------------------------|--|---|
| | | | | Capacidad de almacenamiento específico por volumen [kWh/m ³] | Costos estimados por capacidad [\$/kWh] |
| Aluminio | 2700 | 945 | 200 | 70,8 | 100 |
| Concreto | 2200 | 720 | 1,5 | 44 | 5,5 |
| Hierro fundido | 7200 | 500 | 35 | 100 | 78 |
| Piedras | 2500 | 800 | 1 a 3 | 55 | - |

Marco Regulatorio del Litio en Chile

En 1979, con la entrada en vigencia del Decreto Ley No. 2.886, el litio quedó reservado para el Estado por razones de interés nacional. Por lo anterior es que se lo excluyó del régimen concesional minero y se determinó la tutela de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) para cualquier acto o contrato relacionado con el mineral. En razón de lo anterior, aquellas concesiones con posterioridad a 1979 se encuentran sujetas a lo mandado en los artículos 19 No. 24 de la Constitución Política de la República, y 8 del Código de Minería; en estos se permite la explotación del mineral de tres maneras: (i) por el Estado o sus empresas, (ii) por concesiones administrativas o (iii) por contratos especiales de operación. Cabe tener presente que, la ley orgánica constitucional No. 18.097 en su artículo 3, define al litio como un mineral no concesible.

- **Decreto de Ley 2.886 Art. 5-** Por exigirlo el interés nacional, desde la fecha de vigencia de este decreto ley, el litio queda reservado al Estado.
- **Decreto de Ley 2.886 Art. 6-** Sustitúyase el artículo 8° de la ley número 16.319, por el siguiente: "Por exigirlo el interés nacional, los materiales atómicos naturales y el litio extraídos y los concentrados, derivados y compuestos de aquéllos y éste, no podrán ser objeto de ninguna clase de actos jurídicos sino cuando ellos se ejecuten o celebren por la Comisión Chilena de Energía Nuclear, con ésta o con su autorización previa. Si la Comisión estimare conveniente otorgar la autorización, determinará a la vez las condiciones en que ella se concede. Salvo por causa prevista en el acto de otorgamiento, dicha autorización no podrá ser modificada o extinguida por la Comisión ni renunciada por el interesado".
- **Constitución Política de la República Art. 19 No. 24.-** El Estado tiene el dominio absoluto, exclusivo, inalienable e imprescriptible de todas las minas, comprendiéndose en éstas las covaderas, las arenas metalíferas, los salares, los depósitos de carbón e hidrocarburos y las demás sustancias fósiles con excepción de las arcillas superficiales, no obstante la propiedad de las personas naturales o jurídicas sobre los terrenos en cuyas entrañas estuvieren situadas. Los predios superficiales estarán sujetos a las obligaciones y limitaciones que la ley señale para facilitar la exploración, la explotación y el beneficio de dichas minas.

- **LOC 18.097 Art. 3 (extracto) .-** No son susceptibles de concesión minera los hidrocarburos líquidos o gaseosos, el litio, los yacimientos de cualquier especie existentes en las aguas marítimas sometidas a la jurisdicción nacional ni los yacimientos de cualquier especie situados, en todo o en parte, en zonas que conforme a la ley, se determinen como de importancia para la seguridad nacional con efectos mineros, sin perjuicio de las concesiones mineras válidamente constituidas con anterioridad a la correspondiente declaración de no concesibilidad o de importancia para la seguridad nacional.
- **Ley 18.248 - Código de Minería Art. 8.-** La exploración o la explotación de las sustancias que, conforme al artículo anterior, no son susceptibles de concesión minera, podrán ejecutarse directamente por el Estado o por sus empresas, o por medio de concesiones administrativas o de contratos especiales de operación, con los requisitos y bajo las condiciones que el Presidente de la República fije, para cada caso, por decreto supremo.

Datos de plantas CSP

A continuación se presentan los datos comparativos de las plantas LFR y PTC.

Tabla H.1: Datos relevantes para la comparación de plantas, extraídos de [60][61].

| | PTC | LFR |
|---|--|--|
| Capacidad [Mwe] | 10-200 | 10-200 |
| Razón de concentración | 25-100 | 70-80 |
| Eficiencia solar máxima | 20% (esperada) | 21% (demostrada) |
| Eficiencia solar-to-electric anual | 15% | 8-10% |
| Eficiencia óptica | Mediana a alta | Mediana |
| Concentración del colector | 70-80 soles | >60 soles (dependiendo del reflector secundario) |
| Requerimiento de área [m ² /kWh] | 4 a 6 | 6 a 8 |
| Eficiencia térmica [%] | 30-40 | - |
| Eficiencia peak de planta [%] | 20-25 | 18-20 |
| Costos de capital [\$US/kW] | 3972 | - |
| Costos de capital [\$US/m ²] | 424 | 234 |
| Costos O&P [\$US/kWh] | 0,012-0,02 | Bajo |
| Costos básicos de planta [\$US/W] | 3,22 | - |
| LCOE [\$US/kWh] | 0,26-0,37 (sin TES), 0,22-0,34 (con TES) | 0,17-0,37 (con TES de 6 h) |
| Uso de terreno [m ² /MWh/año] | 6 a 8 | 4 a 6 |
| Potencia específica [W/m ²] | 300 | - |
| Características del sitio solar/radiación requerida | Generalmente sitios con sumas de DNI mayores a 1800 kWh/m ² | |
| Requerimiento de terreno | Grande | Medio |
| Requerimientos de agua [m ³ /MWh] | 0,3-3 | 0,2-3 |
| Aplicabilidad para enfriamiento por aire | Baja a media | Baja |
| Almacenamiento con sales derretidas | Disponible de manera comercial | Posible mas no probado |
| Temperatura de operación [°C] | 250-550 | 150-550 |
| Factor de planta anual [%] | 25-28 (sin TES), 29-43 (7 hr TES) | 22-24 (sin TES) |
| Estabilidad de la red | Mediana a alta | Mediana |
| Posibilidad de instalar un sistema híbrido | Si | Si |
| Posibilidad de almacenamiento | Si, pero no aún con generación de vapor directa | Si, pero no aún con generación de vapor directa |
| Fluido caloportador | Aceites sintéticos, agua/vapor, sales derretidas, aire | Agua/vapor (comercialmente) |
| Condiciones de vapor [°C/bar] | 380 a 540/100 | 260/50 |
| Estatus de desarrollo | Provado ampliamente | Inicios de comercialización |
| Riesgo de desarrollo de la tecnología | Bajo | Medio |
| Proveedores | Sener, Solar Millenium, Abengoa, ACS-Cobra, Acciona, Soler | Austra, MAN Ferrostaal, Novatec, Areva, Industrial Solar, Fera, CNIM |
| Posibilidad de mejoramiento | Limitada | Significativa |

Tabla H.2: Datos relevantes para la comparación de plantas, extraídos de [62]

| | PTC | LFR |
|--|------------|------------|
| LCOE [€ct /kWh] | 17,1 | 17,1 |
| Potencia bruta de turbina [MWel] | 50 | 50 |
| Tamaño de campo optimizado [m²apertura] | 265000 | 360000 |
| Prod. Energía eléctrica (neta) [GWh/año] | 103 | 87 |
| Inversión específica por colector [€/m²apertura] | 275 | 151 |
| Inversión específica relativa al PTC | 100% | 55% |
| Inversión total [M€] | 143 | 119 |
| Inversión en el campo solar [M€] | 73 | 54 |
| Inversión en el bloque de potencia [M€] | 40 | 40 |
| Costo de terreno [M€] | 7 | 5 |
| Costos ingeniería, mano de obra, construcción [M€] | 24 | 20 |
| Costo anual por amortización del seguro [M€/año] | 14,1 | 11,8 |
| Gastos en O&P anuales [M€/año] | 3,4 | 3,1 |

Ejemplo de Flujo de Caja

Tabla I.1: Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 [EP].

| Flujo de Caja Inversionista 40 % + IE, -30 % Li, +30 % Inv | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ingreso por ventas | - | \$58.347.632 | \$58.906.102 | \$59.464.572 | \$60.023.043 | \$60.581.513 | \$61.139.983 | \$61.698.453 |
| Costo variable | - | -\$3.384.366 | -\$3.452.053 | -\$3.521.094 | -\$3.591.516 | -\$3.663.347 | -\$3.736.614 | -\$3.811.346 |
| Costo fijo | - | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 |
| Gasto en administración y ventas | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Depreciación | - | -\$10.944.964 | -\$10.944.964 | -\$10.944.964 | -\$10.944.964 | -\$10.944.964 | -\$10.944.964 | -\$10.940.088 |
| Ganancia/Pérdida de capital | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Interés | - | -\$9.057.625 | -\$8.604.744 | -\$8.151.862 | -\$7.698.981 | -\$7.246.100 | -\$6.793.219 | -\$6.340.337 |
| Pérdidas del ejercicio anterior | - | - | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| Utilidad Antes de Impuestos | - | \$32.821.299 | \$33.764.964 | \$34.707.274 | \$35.648.204 | \$36.587.725 | \$37.525.809 | \$38.467.305 |
| Impuesto de primer orden | 27 % | 27 % | 27 % | 27 % | 27 % | 27 % | 27 % | 27 % |
| Utilidad Después de Impuestos | - | \$23.959.549 | \$24.648.423 | \$25.336.310 | \$26.023.189 | \$26.709.039 | \$27.393.841 | \$28.081.133 |
| Depreciación | - | \$10.944.964 | \$10.944.964 | \$10.944.964 | \$10.944.964 | \$10.944.964 | \$10.944.964 | \$10.940.088 |
| Ganancia/Pérdida de capital | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Pérdidas del ejercicio anterior | - | - | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| Flujo Operacional | - | \$34.904.513 | \$35.593.388 | \$36.281.274 | \$36.968.153 | \$37.654.003 | \$38.338.805 | \$39.021.220 |
| Pago a inversionistas externos | - | -\$8.726.128 | -\$8.898.347 | -\$9.070.319 | -\$9.242.038 | -\$9.413.501 | -\$9.584.701 | -\$9.755.305 |
| Inversión fija | -\$294.372.808 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| Valor residual de los activos | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de trabajo | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Recuperación del capital de trabajo | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Prestamos | \$117.749.123 | - | - | - | - | - | - | - |
| Inversión Externa | \$29.437.281 | - | - | - | - | - | - | - |
| Amortizaciones | - | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 |
| Flujo de Capitales | -\$147.186.404 | -\$13.254.941 | -\$13.427.159 | -\$13.599.131 | -\$13.770.851 | -\$13.942.313 | -\$14.113.514 | -\$14.284.118 |
| Flujo de Caja Privado | -\$147.186.404 | \$21.649.572 | \$22.166.228 | \$22.682.143 | \$23.197.302 | \$23.711.690 | \$24.225.291 | \$24.737.103 |

Tabla I.2: Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 (continuación)
[EP].

| Año 8 | Año 9 | Año 10 | Año 11 | Año 12 | Año 13 | Año 14 | Año 15 | Año 16 | Año 17 | Año 18 | Año 19 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| \$62.256.923 | \$62.815.394 | \$63.373.864 | \$63.932.334 | \$64.490.804 | \$65.049.274 | \$65.607.744 | \$66.166.215 | \$66.724.685 | \$67.283.155 | \$67.841.625 | \$68.400.095 |
| -\$3.887.573 | -\$3.965.324 | -\$4.044.631 | -\$4.125.523 | -\$4.208.034 | -\$4.292.194 | -\$4.378.038 | -\$4.465.599 | -\$4.554.911 | -\$4.646.009 | -\$4.738.929 | -\$4.833.708 |
| -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$10.940.088 | -\$10.940.088 | -\$10.940.088 | -\$7.208.964 | -\$7.208.964 | -\$7.208.964 | -\$7.208.964 | -\$7.208.964 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$5.887.456 | -\$5.434.575 | -\$4.981.694 | -\$4.528.812 | -\$4.075.931 | -\$3.623.050 | -\$3.170.169 | -\$2.717.287 | -\$2.264.406 | -\$1.811.525 | -\$1.358.644 | -\$905.762 |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| \$39.402.429 | \$40.336.029 | \$41.268.074 | \$45.929.657 | \$46.858.498 | \$47.785.689 | \$48.711.196 | \$49.634.987 | \$57.015.238 | \$57.935.491 | \$58.853.923 | \$59.770.495 |
| 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% |
| \$28.763.774 | \$29.445.302 | \$30.125.694 | \$33.528.650 | \$34.206.704 | \$34.883.553 | \$35.559.173 | \$36.233.541 | \$41.621.124 | \$42.292.909 | \$42.963.363 | \$43.632.462 |
| \$10.940.088 | \$10.940.088 | \$10.940.088 | \$7.208.964 | \$7.208.964 | \$7.208.964 | \$7.208.964 | \$7.208.964 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| \$39.703.861 | \$40.385.389 | \$41.065.782 | \$40.737.614 | \$41.415.668 | \$42.092.517 | \$42.768.137 | \$43.442.504 | \$42.371.876 | \$43.043.661 | \$43.714.116 | \$44.383.214 |
| -\$9.925.965 | -\$10.096.347 | -\$10.266.446 | -\$10.184.403 | -\$10.353.917 | -\$10.523.129 | -\$10.692.034 | -\$10.860.626 | -\$10.592.969 | -\$10.760.915 | -\$10.928.529 | -\$11.095.803 |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 | -\$4.528.812 |
| -\$14.454.778 | -\$14.625.160 | -\$14.795.258 | -\$14.713.216 | -\$14.882.729 | -\$15.051.942 | -\$15.220.847 | -\$15.389.439 | -\$15.121.781 | -\$15.289.728 | -\$15.457.341 | -\$15.624.616 |
| \$25.249.084 | \$25.760.230 | \$26.270.524 | \$26.024.398 | \$26.532.938 | \$27.040.575 | \$27.547.291 | \$28.053.066 | \$27.250.095 | \$27.753.933 | \$28.256.774 | \$28.758.598 |

Tabla I.3: Flujo de caja ejemplo, correspondiente al caso PF40EI.4 (continuación)
[EP].

| Año 20 | Año 21 | Año 22 | Año 23 | Año 24 | Año 25 | Año 26 | Año 27 | Año 28 | Año 29 | Año 30 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| \$68.958.566 | \$69.517.036 | \$70.075.506 | \$70.633.976 | \$71.192.446 | \$71.750.917 | \$72.309.387 | \$72.867.857 | \$73.426.327 | \$73.984.797 | \$74.543.268 |
| -\$4.930.382 | -\$5.028.990 | -\$5.129.570 | -\$5.232.161 | -\$5.336.804 | -\$5.443.540 | -\$5.552.411 | -\$5.663.459 | -\$5.776.729 | -\$5.892.263 | -\$6.010.108 |
| -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 | -\$2.139.377 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 | -\$750.752 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$452.881 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| \$60.685.173 | \$61.597.916 | \$62.055.807 | \$62.511.686 | \$62.965.513 | \$63.417.247 | \$63.866.846 | \$64.314.268 | \$64.759.469 | \$65.202.405 | \$65.643.030 |
| 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% | 27% |
| \$44.300.176 | \$44.966.479 | \$45.300.739 | \$45.633.531 | \$45.964.824 | \$46.294.590 | \$46.622.798 | \$46.949.416 | \$47.274.412 | \$47.597.755 | \$47.919.412 |
| \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 | \$750.752 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| \$45.050.928 | \$45.717.231 | \$46.051.491 | \$46.384.283 | \$46.715.577 | \$47.045.342 | \$47.373.550 | \$47.700.168 | \$48.025.165 | \$48.348.508 | \$48.670.164 |
| -\$11.262.732 | -\$11.429.308 | -\$11.512.873 | -\$11.596.071 | -\$11.678.894 | -\$11.761.336 | -\$11.843.388 | -\$11.925.042 | -\$12.006.291 | -\$12.087.127 | -\$12.167.541 |
| \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 | \$0 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | \$ 7.295.480 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$4.528.812 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| -\$15.791.545 | -\$11.429.308 | -\$11.512.873 | -\$11.596.071 | -\$11.678.894 | -\$11.761.336 | -\$11.843.388 | -\$11.925.042 | -\$12.006.291 | -\$12.087.127 | -\$4.872.061 |
| \$29.259.384 | \$34.287.924 | \$34.538.619 | \$34.788.212 | \$35.036.682 | \$35.284.007 | \$35.530.163 | \$35.775.126 | \$36.018.874 | \$36.261.381 | \$43.798.103 |